

## L'économie des ressources naturelles The exploitation of extractive resources

Frederick M. Peterson et Anthony C. Fisher

Volume 53, numéro 4, octobre-décembre 1977

L'économie des ressources naturelles

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/800746ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/800746ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

HEC Montréal

ISSN

0001-771X (imprimé)

1710-3991 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Peterson, F. M. & Fisher, A. C. (1977). L'économie des ressources naturelles. *L'Actualité économique*, 53(4), 510-558. <https://doi.org/10.7202/800746ar>

### Résumé de l'article

A survey of the literature on the economics of natural resources. Extractive resources are classified as renewable or non-renewable, depending on whether they exhibit economically significant rates of regeneration. A unified model of optimal extraction over time is developed, drawing on a number of contributions to the literature. Special features are developed for the renewable and non-renewable cases, and extensions and applications are noted, as well as needs for further research. Policy issues are treated, chief among these being the extent to which the market can be trusted to generate the right rate of extraction. Finally the empirical evidence is reviewed on whether we are running out of extractive resources.

## L'ÉCONOMIE DES RESSOURCES NATURELLES \*

### I — INTRODUCTION

Suscitée en grande partie par la crise de l'énergie et de l'environnement, mais aussi par la publication de l'étude très discutée du Club de Rome (Meadows *et al.*, 1972), une littérature abondante s'est développée au cours des dernières années sur les ressources naturelles et l'environnement. Le sujet n'est cependant pas nouveau. L'homme s'est probablement toujours préoccupé de l'environnement et des ressources qu'il pouvait en extraire. Ses premières préoccupations ont sans doute touché l'eau, la nourriture et le sel, des éléments essentiels à la vie. C'étaient là du moins les préoccupations de Thomas Malthus et de David Ricardo lorsqu'ils décrivirent leur scénario pour le moins alarmant dans lequel les terres cultivables sont limitées et la population est croissante ; si la seule limite à la croissance démographique est la misère alors la croissance se poursuivra jusqu'à ce que la population se retrouve dans l'indigence. W. Stanley Jevons (1865) a étendu ces préoccupations au cas des ressources minérales par ses constatations sur les limites physiques des dépôts de charbon en Angleterre. Il prédit par ailleurs la fin de la révolution industrielle à brève échéance <sup>1</sup>.

Mais, en plus de ces inquiétudes particulières concernant des ressources que l'on peut extraire des sols, il s'est également développé d'autres préoccupations très différentes considérant l'environnement comme une source de services indispensables à une meilleure qualité de vie. John Stuart Mill (1865) s'était fait l'interprète de ce point de vue dans sa discussion sur la qualité de la vie, le besoin de la solitude et de la beauté naturelle. Progressivement une littérature variée que nous avons déjà analysée par ailleurs (Fisher et Peterson, 1976), s'est développée sur la pollution et les usages alternatifs de l'environnement. Ici, nous nous limitons aux ressources extractives, particulièrement aux modèles d'exploit-

---

\* Cet article est paru en anglais sous le titre « The Exploitation of Extractive Resources : A Survey » dans *Economic Journal*, vol. 87, décembre 1977. Nous tenons à remercier messieurs Peterson et Fisher, l'*Economic Journal*, ainsi que Cambridge University Press, qui nous a accordé la permission d'en publier la version française. Traduit de l'anglais par Alfred Cossette.

1. Trente ans plus tard, Leonard Courtney (1897) observe une baisse du taux de croissance industrielle en Angleterre et en conséquence, il affirme que Jevons avait raison.

tation optimale et aux études d'épuisement à long terme des ressources.

Suivant la tradition établie par Siegfried V. Ciriacy-Wantrup (1952) nous classifions les ressources extractives en deux catégories, renouvelables et non renouvelables selon qu'elles affichent un taux de régénérescence économique significatif ou non. Nous présentons un modèle intégré d'exploitation optimale dans le temps à partir de la littérature sur la question. Également nous développons des considérations particulières à chacun des cas et nous soulignons les extensions et les applications possibles de même que les domaines de recherche les plus importants. Les implications en termes de politiques sont également analysées, dont l'aptitude des marchés à susciter les taux d'exploitation appropriés. Finalement, nous réexaminons la question de l'épuisement des ressources à la lumière des données empiriques disponibles.

## II — RESSOURCES RENOUVELABLES

Il existe plusieurs catégories de ressources renouvelables, mais nous nous limitons ici aux pêcheries, car une volumineuse littérature théorique s'est développée sur cette question et la plupart de ces développements sont applicables aux autres catégories de ressources et également aux ressources non renouvelables. Les forêts et l'eau sont également des ressources renouvelables importantes mais la littérature rattachée est orientée vers les applications pratiques et, la littérature sur l'eau en particulier, est trop abondante pour se prêter facilement au type d'examen que nous envisageons ici <sup>2</sup>.

### A. *Un modèle d'utilisation des ressources renouvelables*

Le modèle que nous présentons ici est souvent associé à M.B. Schaefer (1954, 1957), un pionnier dans la modélisation des pêcheries durant les années 50. Colin Clark et Gordon Munro (1975) ont noté les points communs de ce modèle avec la théorie moderne du capital. En fait, il s'apparente largement à un modèle de croissance économique si on fait abstraction de son processus de régénérescence naturelle, ou loi de croissance biologique. À l'encontre des espèces biologiques le capital ne peut croître qu'à travers l'investissement. Prenons le cas d'une seule espèce.

Le taux de variation du stock de l'espèce,  $\frac{dX}{dt}$ , est une fonction du stock actuellement disponible :

$$\frac{dX}{dt} = g(X), \quad (1)$$

2. Pour une étude du secteur de la forêt, nous recommandons Mason Gaffney (1960) et Paul Samuelson (1974) et une étude sur la gestion moderne du secteur par Karl Jungenfelt (1975). Pour le cas de l'eau, voir : *Water Resources Research*, le journal de The American Geophysical Union. La reconstitution des réserves d'eau n'obéit probablement pas aux lois discutées ci-après ; le modèle devrait être modifié en conséquence.

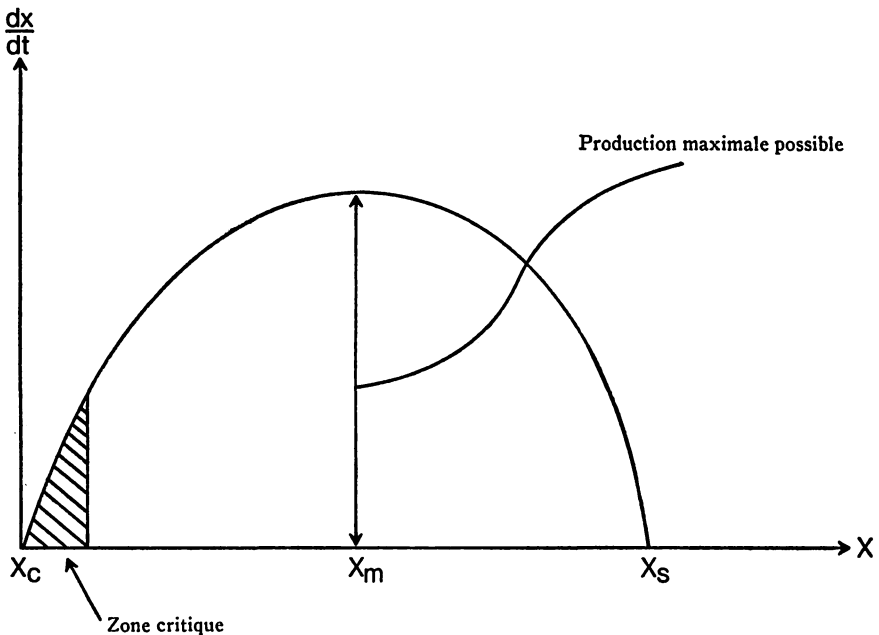
où  $g$  possède deux racines. Le stock est en équilibre ( $\frac{dX}{dt} = 0$ ), lorsque  $X = X_c$  et lorsque  $X = X_s$ , où  $X_c$  est la population minimale viable biologiquement et  $X_s$  est la population maximale que l'environnement peut supporter.  $g(X)$  est positif pour les stocks contenus entre  $X_c$  et  $X_s$ .

Bien que ces lois de croissance ne soient pas acceptées par tous, elles ont néanmoins été largement appliquées aux populations de poissons de même qu'aux oiseaux aquatiques, aux forêts, aux parasites fruitiers, aux bactéries ainsi qu'au comportement humain.

Le diagramme 1 illustre l'équation différentielle (1).

### DIAGRAMME 1

#### FONCTION DE CROISSANCE BIOLOGIQUE



Au point  $X_m$ , l'espèce croît à son taux maximal, lequel coïncide avec le taux d'exploitation maximal pouvant être soutenu indéfiniment. Il est souvent suggéré que  $X_m$  est la population optimale (quantité) d'une ressource renouvelable mais nous verrons que ce n'est habituellement pas le cas. La zone critique est la zone de risque d'extinction de l'espèce (Ciriacy-Wantrup, 1952). Le diagramme présente la loi de croissance logistique popularisée par Alfred Lotka (1925) et qui, depuis, a été

largement utilisée par de nombreux économistes. Si  $g$  est une fonction quadratique et  $X_c = 0$  nous obtenons :

$$\frac{dX/dt}{X} = a(X_s - X), \quad (2)$$

où  $a$  est un paramètre, et  $aX_s$  est le taux de croissance maximal réalisé lorsque  $X$  s'approche de zéro.  $aX_s$  joue un rôle important pour déterminer si l'espèce sera détruite par l'exploitation<sup>3</sup>.

L'extraction des ressources renouvelables diffère des autres processus de production en ce que la production d'une période influence la production de la période suivante en modifiant le stock de ressources restant<sup>4</sup>. Le processus d'extraction peut être décrit à l'aide de fonctions de coûts (Vernon Smith, 1968, 1969) mais des fonctions de production sont plus fréquemment utilisées. Dans cette section nous utilisons une seule fonction de production pour l'ensemble de la ressource. Les fonctions de production des firmes individuelles permettent de traiter explicitement du problème de l'entrée et de la sortie du marché. Ceci est important dans le cas des ressources de propriété commune mais comme nous le verrons les modèles deviennent très compliqués.

Lorsqu'une seule fonction de production est utilisée pour une ressource renouvelable, elle prend habituellement la forme  $f(E, X, t)$  où la variable temps permet la réalisation du progrès technique, et  $E$  est un indice reflétant les efforts de pêche, ou la quantité d'intrants, représentant à la fois le capital et le travail. La présence de  $X$  dans la fonction permet à la production d'une période d'influencer la production de la période suivante et résulte en des conflits importants lorsque la ressource est de propriété commune.  $f_X$  est positive, montrant ainsi les avantages en termes de production, d'un stock plus important au départ.  $f_E$  est supposée positive pour des raisons évidentes, et  $f_{EE}$  est négative, ce qui traduit des rendements décroissants dans les efforts de pêche attribuables à l'encombrement dans le voisinage de la ressource. Smith discute en détail le problème

3. Zellner (1970) et Southey (1972) ont suggéré que la loi de croissance logistique est trop simple. Southey a montré que des processus de croissance différents peuvent modifier les conclusions des modèles des pêcheries ; R.J.H. Beverton et S.L. Holt (1957) ont examiné un grand nombre de ces processus dans leur étude globale sur la dynamique des populations de poissons sous exploitation. Lee Talbot (1975) soutient qu'une loi de croissance plus réaliste doit tenir compte de la structure âge-sexe de la population, la concurrence et la symbiose avec les autres espèces, et les variations stochastiques dans l'environnement.

4. On a cru jadis que l'homme ne pouvait pas modifier le stock de poissons (Huxley, 1881 ; Marshall, 1898). Mais plus tard il est devenu évident que ce n'était pas le cas lorsque les populations de poissons dans les eaux européennes s'accroissent substantiellement alors que les efforts de pêche diminuent durant la première et la deuxième grande guerre mondiale (Gordon, 1954).

de l'encombrement et celui des effets externes attribuables à la dimension des mailles des filets <sup>5</sup>.

La littérature attribue diverses formes à la fonction  $f$  sans toutefois les justifier suffisamment. Certains croient qu'elle présente des rendements constants à l'échelle, d'autres, qu'elle prend la forme d'une fonction Cobb-Douglas ou encore qu'il s'agit de fonctions multiplicatives. La forme multiplicative est fréquemment utilisée et elle est associée, à une technologie extractive permettant l'exploitation très rapide d'une ressource. Elle peut se justifier en notant les similitudes entre les pêcheries et les réactions chimiques, bien qu'une forme donnée de la fonction semble être utilisée plus fréquemment pour des raisons reliées plutôt à la facilité des calculs qu'à la biologie ou au comportement <sup>6</sup>. La fonction de production de Paul Bradley (1970) est une exception car elle dérive d'une analyse explicite des procédés de pêche.

Les processus de croissance et d'extraction que nous venons de décrire peuvent être combinés pour produire l'un des modèles économiques parmi les plus complets qui soient, incluant les effets externes, la dynamique stock-flux, l'équilibre multiple, l'optimisation dynamique et la gestion de la ressource sous divers régimes et politiques. Quelques questions clés traitées dans la littérature sont : (1) Quel est le taux d'exploitation optimal ? (2) Pourquoi la production maximale peut-elle ne pas être optimale ? (3) En quoi les comportements compétitifs et optimaux sont-ils différents ? (4) Sous quelles conditions l'extinction peut-elle survenir ?

Pour répondre à ces questions il faut considérer que l'extraction des ressources renouvelables implique un processus d'optimisation dynamique et que le niveau d'extraction doit être déterminé dans le temps et non seulement à un moment donné. Ainsi nous décrivons un modèle dans lequel le propriétaire ou le gérant d'une exploitation de pêche maximise la valeur actualisée de la ressource. Afin de pouvoir s'attarder davantage à la question plus importante de l'optimisation dynamique nous posons l'hypothèse que les prix des extrants et des efforts de pêche,  $P$  et  $W$ , sont des paramètres pour l'exploitation de pêche, i.e., que les marchés des produits et des facteurs sont en concurrence parfaite. La valeur actualisée de la ressource est donnée par l'intégrale,

$$\int_0^{\infty} [Pf(E, X, t) - WE] e^{-rt} dt, \quad (3)$$

où  $r$  est le taux d'escompte.

5. La dimension des mailles influence la structure-âge et, par conséquent, le taux de croissance de la population.

6. Les réactions chimiques de second ordre nécessitant la rencontre de deux molécules réactives s'effectuent à des taux proportionnels au produit des concentrations

La valeur actualisée est maximisée sous la contrainte,

$$\frac{dX}{dt} = g(X) - f(E, X, t), \quad (4)$$

et

$$X_s \geq X \geq 0, \text{ et } E \geq 0$$

Il est possible d'utiliser le calcul de variation pour résoudre ce problème (James Crutchfield et Arnold Zellner, 1962). Mais nous préférons le principe du maximum de L.S. Pontryagin *et al.* (1962). Il s'agit ici d'une méthode technique mais nous nous limitons à seulement quelques éléments accompagnés des interprétations économiques appropriées.

Selon le principe du maximum, il est nécessaire que la valeur du hamiltonien :

$$H = Pf(E, X, t) - WE + q[g(X) - f(E, X, t)] \quad (5)$$

soit maximisée instantanément.  $q$  est le prix fictif ou le coût d'usage marginal, c'est-à-dire le montant par lequel la valeur actualisée de l'exploitation de pêche au temps  $t$  est réduite (accrue) lorsqu'une unité additionnelle de poisson est soustraite (ajoutée). Notons que dans la plupart des cas,  $q$  ne peut pas être observé directement, mais doit être dérivé des prix actuels et futurs, des technologies et des stocks de ressources<sup>7</sup>. Lorsque ces paramètres sont incertains, comme c'est habituellement le cas, le coût d'usage peut varier grandement avec les anticipations individuelles. Si un propriétaire de ressources croit que les prix seront plus élevés dans un avenir rapproché, son coût d'usage pour la vente d'une unité de poisson aujourd'hui plutôt que demain par exemple, sera plus élevé.

Pour maximiser le hamiltonien, nous posons la dérivée partielle par rapport à la variable de contrôle égale à zéro :

$$H_E = Pf_E - W - qf_E = 0. \quad (6)$$

Après un réarrangement des termes et une division par  $f_E$ , nous constatons que le prix,  $P$ , est égal au coût marginal d'extraction,  $W/f_E$ , plus le coût d'usage marginal,  $q$ . Notons que le prix n'est pas posé égal au coût marginal de production comme dans le cas des biens de consommation courante et que la différence, le coût d'usage marginal, n'est pas due à une imperfection du marché.

des deux substances réactives (Moore, 1955). Dans le cas de la pêche, le pêcheur peut être l'une des substances réactives ( $E$ ) et le poisson l'autre, dont la concentration est  $X$ . Des lois semblables ont été développées dans le cas du processus de prospection d'un emploi (Holt, 1970) et pour prévoir le nombre de rencontres entre les utilisateurs d'une zone sauvage (*wilderness area*) (Cicchetti et Smit, 1973).

7. Le stock de poissons peut être modifié de diverses façons — en les attrapant ou en ajoutant de nouveaux individus au stock actuel. Nous ne traitons pas cette dernière possibilité ici. S'il est disponible, le prix du marché pour acquérir de nouveaux individus indiquera directement la valeur de  $q$ .

Il est également nécessaire pour un maximum de (3) que le sentier temporel de  $q$  soit décrit par l'équation différentielle,

$$\frac{dq}{dt} = -H_x + rq = -Pf_x - qg_x + qf_x + rq, \quad (7)$$

laquelle assure que les poissons non capturés constituent un investissement aussi attrayant que d'autres investissements. L'équation signifie que le gain en capital réalisable sur la vente d'une unité additionnelle de poisson,  $\frac{dq}{dt}$ , plus les revenus additionnels ainsi suscités,  $Pf_x$ , plus la valeur de la croissance additionnelle,  $qg_x$ , moins le coût d'usage de la production additionnelle suscitée,  $qf_x$ , moins le coût d'option sur les réserves de poissons,  $rq$ , doit être égal à zéro. Dans le cas contraire, les poissons non capturés ne seront pas aussi attrayants que d'autres investissements, et les investisseurs chercheront à faire monter ou baisser le prix  $q$ , selon le cas.

Les équations différentielles (1) et (7) décrivent la dynamique de l'exploitation de pêche qu'on peut analyser avec un diagramme de phase dans l'espace  $X_q$  tel que le font Quirk et Smith (1970). En l'absence de progrès technique ou de changements dans  $P$ ,  $W$  ou  $r$ , la trajectoire, dans les modèles de ressources renouvelables, demeure dans le voisinage de l'état d'équilibre stable ou « *turnpike* »<sup>8</sup> la plus grande partie du temps (Plourde, 1970) ; nous ferons donc abstraction de la dynamique à court terme pour nous concentrer sur l'état d'équilibre stable. A l'état d'équilibre, le taux de variation de  $X$  et  $q$  doit être nul et la condition (6) de maximisation de la valeur actualisée doit se vérifier.

Une autre façon d'envisager le problème serait de considérer que la production de poisson  $Y$ , doit être égale au taux de régénérescence,  $g(X)$ , afin que le stock de poissons reste constant, et que la condition de maximisation de la valeur actualisée doit être satisfaite pour que le gérant de l'exploitation de pêche puisse garder constant le niveau d'intrant. Afin de déterminer le stock de poissons, le niveau des efforts de pêche et la production de poisson, à l'état d'équilibre stable optimal, nous nous servons d'une technique graphique empruntée à John Gould (1972) pour dériver le « lieu géométrique des prises » (*catch locus*). Pour chaque niveau de stock  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , il existe une courbe représentant la production comme une fonction des efforts de pêche (utilisation d'intrants) et dont la pente est égale à  $f_E$  (Diagramme 2). Le gérant

8. La terminologie utilisée ici reflète le lien de parenté avec les modèles de croissance néo-classique.



choisit le niveau d'intrant de telle sorte que  $f_E = \frac{W}{p-q}$ , pour satisfaire la condition de maximisation (6) ; ainsi, la production optimale pour  $X = X_1$  sera  $Y^* (X_1)$  et ainsi de suite. Le lieu géométrique des  $X$  et  $Y$  obtenu est « le lieu géométrique des prises ». Dans le diagramme 3, les lieux géométriques pour les cas  $Y^*_1, Y^*_2, Y^*_3$  sont superposés à la fonction de croissance pour donner les stocks et la production de l'état d'équilibre stable optimal. Il devient clair à partir du diagramme 2 que la position du lieu géométrique des prises dans le diagramme 3 est fonction de  $W, p, q$  et des paramètres de la fonction de production. Le lieu géométrique des prises croise l'axe des  $X$  dans le diagramme 3, et la pêche cesse, au niveau de stock,  $X_i$ , pour lequel  $f_E(0, X_i, t) = \frac{W}{p-q}$ .

Au point  $X_i$ , les efforts de pêche doivent être réduits à zéro ( $f_{EE} < 0$ ) avant que la valeur marginale de la productivité des efforts moins le coût d'usage,  $(p-q)f_E$ , égale le coût des efforts,  $W$ . Si  $f_{EX}$  est positive, comme on pourrait s'y attendre<sup>9</sup>, plus  $\frac{W}{p-q}$  s'élève (baisse), plus  $X_i$  se déplace vers la droite (gauche).

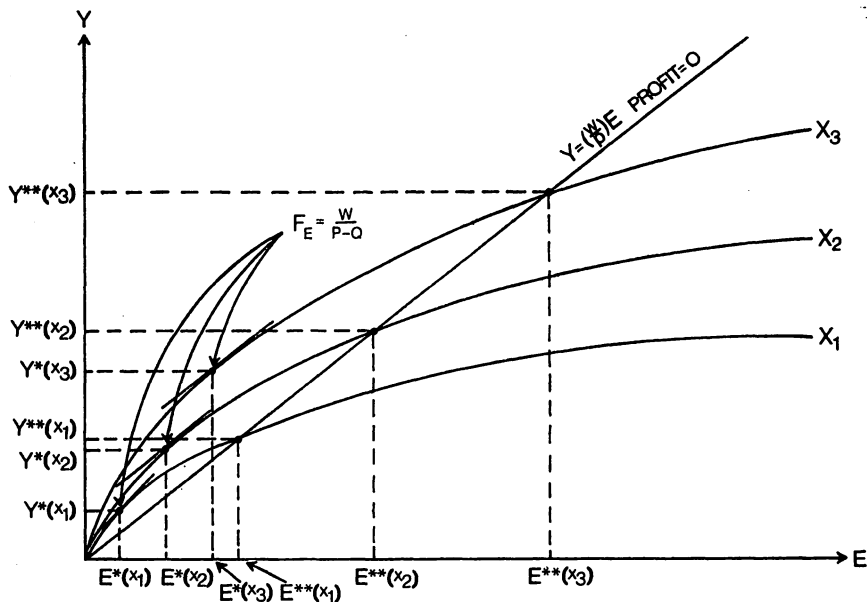
L'état d'équilibre est réalisé lorsque le lieu géométrique des prises croise la courbe de croissance naturelle. Les niveaux d'intrants sont en équilibre en tout point du lieu géométrique des prises et le stock de poissons est en équilibre à l'intersection car  $\frac{dX}{dt} = g(X) - Y = 0$ .

Notons que dans aucun des cas fournis à titre d'illustration dans la littérature, la production soutenue maximale (*maximum sustainable yield*),  $X_m$ , est optimale. Ceci est intéressant étant donné que ce niveau de production est souvent recommandé, par exemple dans la politique forestière aux États-Unis et au Canada (Goundry, 1960, U.S. Laws Statutes, etc., 1960). Smith (1968, 1969) soutient que l'optimum se situe toujours à la droite de  $X_m$ , lorsque la capture du poisson implique un coût. Ceci semble dériver de l'hypothèse douteuse que retient également H. Scott Gordon (1954), à l'effet que le gérant ignore le coût d'usage et maximise le profit courant. Il nous semble plus raisonnable de supposer, à l'instar de Anthony Scott, qu'un propriétaire de ressources jouissant de droits d'exploitation permanents maximise la valeur actualisée (1955). Dans ce cas, Crutchfield et Zellner (1962), Charles Plourde (1970) et Gardner Brown (1974) démontrent que le taux d'escompte déplace l'équilibre vers la gauche de sorte qu'il peut se situer d'un côté

9.  $f_{EX}$  devrait être positive car un accroissement des efforts devrait être plus productif lorsque le stock de poissons augmente et, inversement, un accroissement du stock sera plus profitable si les pêcheurs réalisent de plus gros efforts.

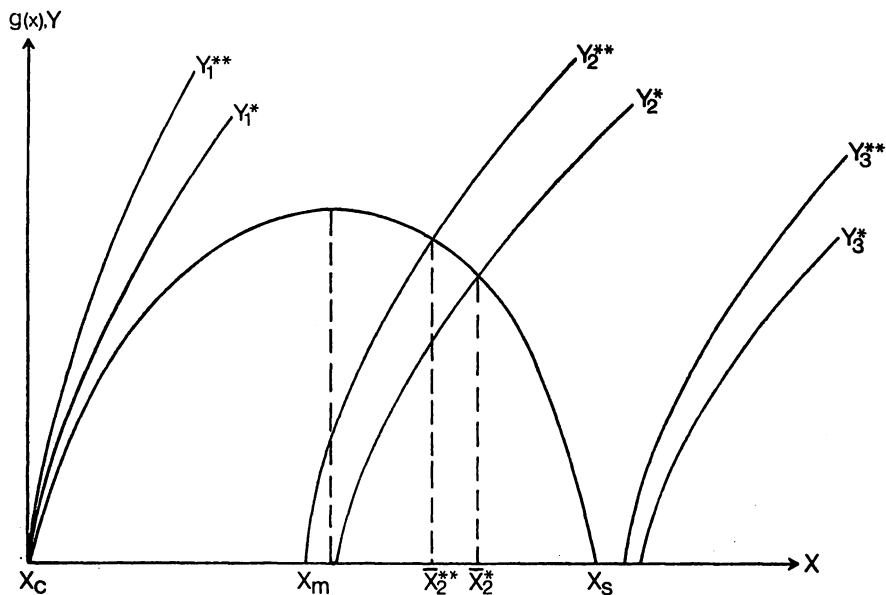
## DIAGRAMME 2

DÉRIVATION DU LIEU GÉOMÉTRIQUE DES PRISES



## DIAGRAMME 3

PRODUCTION ET STOCK D'ÉQUILIBRE



ou de l'autre de  $X_m$ . Ce serait pure coïncidence s'il devait se fixer précisément sur  $X_m$ <sup>10</sup>.

Un examen de chaque cas indique premièrement que  $Y^*$  décrit une exploitation de pêche qui n'est pas suffisamment rentable pour continuer d'opérer en raison des prix trop bas ou de la difficulté de capturer les poissons. Dans le cas de  $Y^*_2$ , l'exploitation est opérée et le stock d'équilibre est  $\bar{X}_2$ . Notons que cet équilibre est stable car  $Y \gtrless g(X)$  si et seulement si  $X \gtrless X^*_2$ . Si, pour quelque raison que ce soit, le stock devait être différent de sa valeur d'équilibre, la production de poissons et les taux de croissance corrigeraient la situation. Dans le cas de  $Y^*_1$ , le poisson est voué à l'extinction car le niveau optimal des prises de l'exploitation excède le taux de croissance naturel pour chaque niveau de population. Les poissons restent faciles à capturer même si leur nombre se rapproche de zéro et, étant donné le taux d'escompte, ne croissent pas assez rapidement pour justifier qu'on retarde leur capture. Ainsi l'extinction peut survenir même s'il s'agit d'une exploitation à propriétaire unique. Quirk et Smith (1972), Clark (1973) et Philip Neher (1974), développent cette question avec plus de rigueur. Il est possible que les baleines, par exemple, soient si faciles à attraper, qu'il serait rentable de chercher à capturer la dernière, ou à tout le moins, de réduire la population à  $X_c$ , alors que la morue soit tellement difficile à capturer que sa survivance serait assurée compte tenu de la technologie actuelle (Gould, 1972).

### B. *Le problème de la propriété commune*

Nous venons de voir que l'extinction peut survenir sous un régime d'exploitation optimale dans le cas d'une exploitation de pêche à propriétaire unique. Cette situation est même plus probable encore dans le cas d'une exploitation de propriété commune. Tel que Gordon l'a mon-

10. Dans le cas où  $r = 0$  et  $W = 0$ , (6) et  $f_E > 0$  nous indique que  $g_x = 0$  pour un état d'équilibre stable, se qui signifie que  $X_m$  est optimal. Il semble raisonnable de choisir le stock qui fournit le niveau de production le plus élevé à perpétuité. Un déplacement vers la droite permet d'économiser des efforts, mais ici les efforts ne coûtent rien. D'autres poissons peuvent être capturés pour une certaine période de temps tout en épuisant les stocks en se déplaçant vers la gauche, mais les pertes futures ont un poids très important lorsque le taux d'extraction est nul.

Avec  $r > 0$  et  $W = 0$ , (6) nous donne  $P - q = 0$ , mais (7) donne  $q(-g_x + r) = 0$  pour un état d'équilibre stable. Ainsi,  $g_x = r > 0$ , ce qui signifie que l'équilibre est à la gauche de  $X_m$ . Il est avantageux de se déplacer vers la gauche et de capturer temporairement plus de poissons car les diminutions dans les prises sont actualisées.

Avec  $r = 0$  et  $W > 0$ , (6) donne  $P - q = \frac{W}{E} > 0$ , et (7) donne  $g_x = \frac{-(P - q)}{q} f_x < 0$ . Ainsi, l'équilibre est à la droite de  $X_m$ . Des efforts sont économisés pour des stocks plus élevés car  $f_x > 0$  et les efforts coûtent quelque chose ici.

tré, les firmes entrant librement sur le marché ont pour effet de faire disparaître la rente lorsque l'exploitation de pêche est de propriété commune et qu'aucune entente de coopération a pu être conclue (1954). Les firmes négligent les déséconomies externes dues à l'encombrement qu'elles suscitent de même que le coût d'usage de l'épuisement du stock de poissons. Si nous supposons que toutes les firmes sont identiques on peut poser qu'elles entrent sur le marché jusqu'à ce que  $PY - WE = 0$ . Cette condition de profit nul correspond à la relation

linéaire  $Y = \left(\frac{W}{P}\right) E$  du diagramme 2. Le lieu géométrique des prises,

dans le cas de libre entrée, se trouve en considérant l'intersection de  $Y = \left(\frac{W}{P}\right) E$  et la courbe de production pour chaque stock.  $Y_1^{**}$ ,  $Y_2^{**}$ , et

$Y_3^{**}$  représentent les lieux géométriques des prises dans le cas de libre entrée, pour les trois cas du diagramme 3. Il est habituellement soutenu (Gordon, 1954 ; Christy et Scott, 1965) que l'exploitation concurrentielle entraîne des efforts de pêche plus grand et des stocks moindres que ce qui serait optimal. Cela se vérifie dans le diagramme 2, et le diagramme 3 dans le cas du centre. Notons toutefois que dans le cas où l'équilibre serait à la gauche de  $X_m$ , les efforts de pêche pourraient être moins élevés avec entrée libre tel que Smith (1962) l'a suggéré et C. Southey (1972) l'a démontré. Les stocks pourraient être tellement réduits que les efforts de pêche seraient tout juste récompensés. Notons également que les stocks, dans le cas de libre entrée, sont toujours moins élevés que les stocks optimaux dans notre modèle, mais ils peuvent être plus élevés dans d'autres modèles. Southey analyse le cas du saumon et des autres espèces nécessitant une certaine épuration périodique. Des compétiteurs ayant un accès libre au marché peuvent faire moins d'épuration que le niveau optimal et ainsi laisser les stocks atteindre des niveaux excessifs.

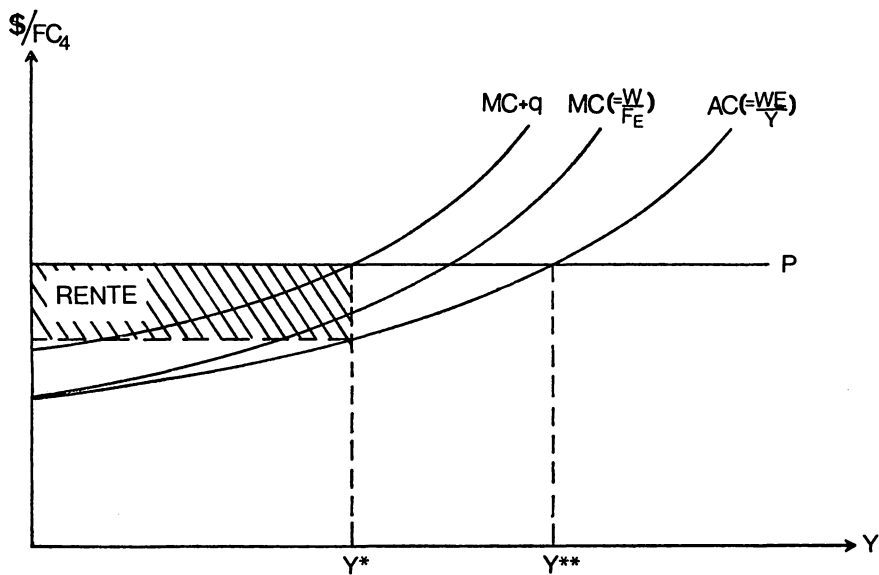
Pour un stock donné, la production sera toujours supérieure en concurrence parfaite. Le diagramme 2 traduit cette situation. Ainsi, l'inter-

section de  $Y = \left(\frac{W}{P}\right) E$  avec la courbe de production pour un stock donné se produit toujours à la droite du point où  $f_E = \frac{W}{p - q}$ . Cette relation

entre la gestion optimale privée et l'entrée libre est illustrée dans le diagramme 4. Pour un stock donné, la gestion optimale implique que la production soit poussée jusqu'au point  $Y^*$ , où le coût marginal d'extraction plus le coût d'usage marginal égale le prix, produisant la rente indiquée. Dans une situation de libre entrée, les concurrents apparaissent et accroissent leurs efforts aussi longtemps que le coût moyen est inférieur

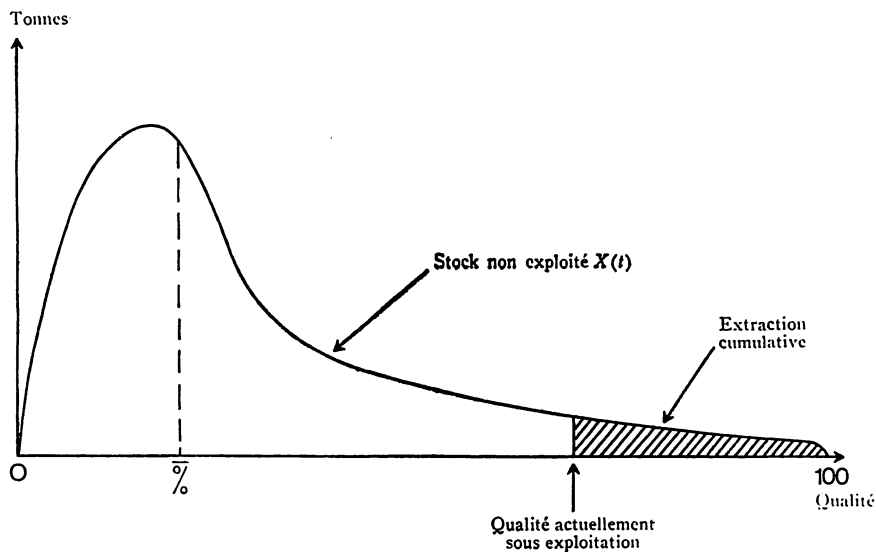
## DIAGRAMME 4

COMPARAISON DE L'ÉQUILIBRE OPTIMAL ET CONCURRENTIEL POUR  
UN STOCK DE POISSONS DONNÉ



## DIAGRAMME 5

DISTRIBUTION TONNAGE-TENEURE POUR UN MINÉRAI



au prix, pour atteindre le point  $Y^{**}$  et produire une rente nulle. Pour un stock donné, la production en concurrence parfaite est supérieure, mais l'entrée libre peut faire diminuer le stock jusqu'à un point où la production devient plus faible que ce qu'elle serait en régime optimal.

Les comportements concurrentiels peuvent être modifiés de diverses façons. Une taxe à deux composantes peut être utilisée pour inciter les compétiteurs à agir de façon efficace (i.e. comme un propriétaire unique). Une partie de cette taxe pourrait couvrir le coût d'usage et une autre, le coût d'encombrement. La taxe par unité de poisson capturé est égale au coût d'usage marginal plus la différence entre le coût marginal et le coût moyen,  $q + \left( \frac{W}{f_E} - \frac{WE}{Y} \right)$ . Smith (1969) présente

une forme de taxation tenant compte également des effets externes occasionnés par la dimension nette des mailles des filets. Malheureusement, nous vivons dans un monde où l'optimalité est très difficile à réaliser et de nombreuses contraintes institutionnelles interdisent aux économistes d'imposer de telles taxes. Diverses catégories de réglementations inefficaces sont utilisées telles que les limitations de territoires, les fermetures de territoires et les fermetures saisonnières. La plupart atteignent leur objectif de conservation des stocks mais accroissent les coûts et parfois réduisent les autres populations de poissons. Par exemple, si les bateaux sont limités à une courte saison dans la zone équatoriale, ceci signifie qu'ils pêchent ailleurs durant le reste de l'année avec plus d'intensité qu'ils ne le feraient autrement. Les problèmes de la réglementation des propriétés communes ont suscité de sérieux conflits internationaux tels que la récente « guerre de la morue » entre l'Islande et la Grande-Bretagne. Des conférences internationales ont eu lieu (Turvey et Wiseman, 1957 ; H. Hamlish, 1962 ; Organisation de Coopération et de Développement Economique, 1972) et une littérature très abondante s'est développée sur la question (Gordon, 1954 ; Scott, 1955 ; Crutchfield, 1964 ; Turvey, 1964 ; Christy et Scott, 1965 ; Scott, 1970).

### C. *Quelques extensions et applications pratiques*

Un grand nombre d'extensions du modèle de la section II A ont été développées. Les prix des extrants et des efforts ne sont pas toujours constants. Plourde (1971) élabore un modèle d'équilibre général avec deux biens dont l'un d'entre eux est produit à partir d'une ressource provenant d'une propriété commune. Quirk et Smith (1970) considèrent le cas d'espèces multiples en interaction dans un cadre d'équilibre général. Smith (1968, 1969) considère explicitement le processus d'investissement plutôt que de supposer qu'il n'existe qu'une seule variable, le niveau des efforts. A l'aide de la théorie Kuhn-Tucker, dans le cas discret, Oscar

Burt et Ronald Cummings (1970) ont construit un modèle de production et d'investissement dans les industries basées sur les ressources naturelles, renouvelables et non renouvelables.

Un grand nombre d'applications aux ressources autres que le poisson ont également été développées. Cummings (1971), Burt (1964, 1970, 1967) et d'autres ont appliqué des versions du modèle au cas de l'eau. Brown et Juld Hammack (1972, 1973, 1974) ont développé des schémas de gestion optimale pour les migrations d'oiseaux aquatiques ; Smith (1975) a utilisé ce modèle pour expliquer l'extinction des animaux pré-historiques ; J.R. Beddington, C.M.K. Watts et W.D.C. Wright (1975) ont calculé des taux d'exploitation optimale pour le cerf ; A. Michael Spence (1973) a étudié la condition des baleines bleues ; et Paul Samuelson (1974) a appliqué le modèle à l'exploitation des forêts.

Dans l'état actuel de leur développement, ces modèles sont d'excellents instruments pour l'étude des concepts et des techniques d'optimisation dynamique, particulièrement en présence d'effets externes. Malheureusement, ils ne peuvent être utilisés pour gérer les ressources naturelles actuelles car leur formulation fonctionnelle est trop simplifiée et leur contenu empirique trop peu développé. Dans le cas des pêches, par exemple, nous ne savons pas quelle est la production maximale possible avec précision, sans parler des paramètres de croissance et des fonctions de production. Toutefois, une coopération accrue entre les professionnels de l'économie et des sciences naturelles pourrait concourir à développer la base empirique pour permettre aux modèles d'optimisation dynamique d'offrir des directives plus claires aux responsables des exploitations de pêche et des autres ressources naturelles.

Les autres études empiriques que nous avons consultées ne touchent pas tellement aux modèles dynamiques et aux problèmes malthusiens à long terme. Certaines études économétriques analysent l'évolution à court terme des marchés, par exemple l'étude de Crutchfield et Zellner (1962) sur le flétan du Pacifique, et l'étude de Frederic Bell ayant trait aux effets des coutumes religieuses catholiques sur les prix du poisson. Quelques auteurs ont appliqué des modèles dotés d'un processus de croissance dynamique mais ils procèdent par optimisation statique plutôt que par la maximisation de la valeur actuelle. Lawrence Van Meir (1967) applique un tel modèle à l'aiglefin, Bell (1972) aux homards, L.K. Boerema et J.L. Obarrio (1962) aux crevettes, et Herbert Mohring (1974) aux flétans. Les seules applications de modèles dynamiques que nous connaissons sont celles de Brown et Hammack sur les migrations des oiseaux aquatiques, celle de Beddington, Watts et Wright sur les cerfs et l'étude de Spence sur la baleine bleue. Il y aurait probablement plus d'études empiriques si plus de données étaient disponibles, des données telles que celles recueillies et analysées par R.J. Beverton et S.J. Holt (1957) sur

la croissance biologique, et par Salvatore Comitini et David Huang (1967) sur les parts des facteurs dans la pêche du flétan. Un grand nombre d'informations utiles sont contenues dans des ouvrages non publiés du gouvernement ou sur des filières informatisées (voir, par exemple, U.S. Department of Commerce, 1974).

### III. RESSOURCES NON RENOUVELABLES

Les ressources non renouvelables telles que le pétrole et le cuivre ne se régénèrent pas naturellement et les procédés de recyclage artificiel sont limités par l'économie et la nature. Il s'agit d'opérations coûteuses et aucun matériau ne peut être complètement recyclé. L'énergie n'est pas recyclable du tout <sup>11</sup>. Nous décrivons ci-après la théorie des mines, c'est-à-dire la théorie de l'épuisement optimal complet et final d'un stock <sup>12</sup>.

#### A. *La théorie des mines : approches statiques*

La plupart des économistes, de Ricardo à Frank Taussig, se sont intéressés aux théories des rentes et des rendements décroissants appliqués au cas des mines. Cependant la première théorie complète des mines fut formulée par Lewis Gray (1914). En dépit de la nature intrinsèquement dynamique des mines, il a pu déduire les propriétés du sentier temporel des prix et les effets des taxes et des changements de prix à l'aide de la seule théorie micro-économique statique et d'exemples numériques. Traitant plus particulièrement du cas de l'or, Frank Paish (1938) distingue l'extraction à partir des mines actuellement en opération et l'investissement dans les nouvelles exploitations et soutient que l'incertitude et les taux d'intérêt élevés encouragent la première mais découragent la seconde. Par la suite, il dérive des considérations plus générales. Scott (1955), Anthony Fisher et John Krutilla (1975) notent que des taux d'intérêt peu élevés auraient pour effet de stimuler les investissements en général et, par le fait même, accéléreraient l'épuisement de certaines ressources, incluant l'environnement naturel où sont localisées les dépôts miniers. Scott (1953, 1955) soutient également que les propriétaires de mines doivent considérer le coût d'usage de même que le coût d'extraction dans leur décision d'exploitation. Tel que nous l'avons noté plus haut, le coût d'usage est la baisse de la valeur d'un actif attribuable à son utilisation ; il s'agit d'un coût d'amortissement endogène par opposition au coût exogène relié seulement au passage du temps. La notion de coût d'usage permet d'analyser l'extraction des ressources non renouvelables à l'aide de méthodes statiques, mais le problème reste

11. La notion d'entropie popularisée par Nicholas Georgesen-Roegen (1971) peut s'appliquer ici.

12. Par extraction de minerai on entend ici l'extraction de toutes les catégories de ressources non renouvelables, incluant le pétrole et le gaz.



de nature dynamique. Tel que Scott le précise, le coût d'usage est déterminé par l'ensemble du sentier temporel futur des coûts et des prix et non seulement par les conditions courantes.

Dans un autre exercice sur la théorie microstatique, Donald Carlisle (1954) tient compte des connaissances actuelles du génie minier et soutient que la quantité de minerai extraite d'une mine est fonction d'une décision endogène de la firme basée sur les prix et la technologie. Le minerai est comparable au jus d'une orange. Le volume total qu'on peut en extraire est fonction de la force appliquée pour la presser, mais il en reste toujours une certaine quantité qu'on ne peut extraire. Nous précisons plus loin que cette situation est reliée à la définition même de réserve. Il s'agit habituellement de la quantité connue d'un minerai pouvant être extrait avec profits aux prix courants et à l'aide de la technologie courante. Un accroissement des prix, une découverte, des progrès techniques, tous ces éléments peuvent accroître les réserves (Brolest, Pratt et McKelney, 1973).

### B. *Un modèle dynamique*

La décision de presser l'orange, ainsi que la force à appliquer et le moment approprié pour le faire, est fonction des conditions présentes mais aussi futures des marchés. Nous posons l'hypothèse qu'un gestionnaire souhaite déterminer le sentier temporel d'extraction maximisant la valeur actuelle d'une ressource épuisable. De toute évidence, ce problème nécessite l'emploi de techniques d'optimisation dynamique. Le premier article traitant de la question est celui de Harold Hotelling (1931), suivi par Richard Gordon (1967) et Cummings (1969). Ils utilisent des fonctions de coût et le calcul des variations pour déterminer les sentiers temporels optimaux. Nous formulons plutôt un modèle en termes de fonction de production et du principe du maximum compte tenu de notre modèle de ressources renouvelables et de plusieurs autres développements récents.

La production dans une mine donnée devient une fonction  $f(E, X, t)$ , des efforts, du temps et du stock de ressources restant. La mine renferme un stock initial,  $X_0$ , moins l'extraction cumulative ; ainsi

$$X(t) = X_0 - \int_0^t Y(t) dt.$$

De plus, nous supposons que les ressources de la mine appartiennent à un propriétaire unique et que tous les problèmes liés à la propriété commune sont résolus. Cummings (1969) et Robert Dorfman (1975) considèrent certains problèmes associés à la propriété commune du pétrole, du gaz et des minéraux en eaux profondes.

Si  $P$  et  $W$  représentent les prix des extrants et des efforts d'extraction, l'intégrale de la valeur actualisée, l'équation du système, le hamiltonien et les conditions nécessaires sont données par les équations (3), (4), (5), (6) et (7) moins la fonction de croissance  $g(X)$ . L'interprétation donnée à ces équations est la même que précédemment : (6) détermine le taux d'extraction du minerai et (7) ajuste  $q$  pour permettre au minerai non extrait de rester aussi attrayant que d'autres actifs.

Lorsque la production n'est pas influencée par le stock de ressources restant ( $f_x = 0$ ),  $q$  croît au taux  $r$  (équation 7) tel que l'ont suggéré Robert Solow et d'autres (1974). Il s'agit d'un résultat plausible car un propriétaire de ressources sera indifférent entre un dollar maintenant et  $e^{rt}$  dollars dans  $t$  années sur une unité marginale de production<sup>13</sup>. Mais notons que les profits marginaux augmentent plus lentement que  $r$  et peuvent même diminuer lorsque  $f_x > 0$ <sup>14</sup>. Si la non-utilisation d'une unité de la ressource augmente la production, *ceteris paribus*, les profits futurs n'ont pas à être aussi élevés ; ils comportent les bénéfices d'une production accrue à un coût nul durant les années écoulées (Cumings, 1969 ; Weinstein et Zeckhauser, 1975). Les prix suivent un sentier plus complexe qui est fonction des taux de variation dans le coût d'extraction et le coût d'usage marginaux, lesquels en retour dépendent de l'offre et de la demande. Les prix pourraient fort bien diminuer s'il y a progrès technique (Scholze, 1974) ou encore, découverte d'un nouveau dépôt ou baisse de la demande.

### C. Extensions du modèle

Pour être utile aux preneurs de décision, le modèle doit être adapté à l'analyse de politiques concrètes telles que les incitations fiscales ou les baux miniers. Hotelling (1931) et Frederick Peterson (1976) ont amorcé cette étude mais des modèles plus complexes encore doivent être développés ; on le voit à la lecture des articles contenus dans Mason Gaffney (1967) et Michael Crommelin (1970). Les éléments importants pouvant jouer un rôle dans l'analyse des politiques sont le monopole, l'exploration, l'incertitude et le recyclage.

#### 1. Monopole

Notre modèle décrit le comportement de propriétaires miniers qui détiennent une mine parmi d'autres et font face à des prix paramétriques. Mais supposons pour le moment qu'il s'agit plutôt d'un monopoleur qui

13. Geoffrey Heal (1975) a tenté de vérifier ce résultat à l'aide de données fournies par le « London Metal Exchange ».

14. Pour que cela soit vrai, il faut que  $P > q$ , et si l'extraction se réalise, avec  $W > 0$ , la valeur de l'unité de ressource marginale extraite,  $P$ , doit excéder sa valeur avant l'extraction,  $q$ .

possède la seule mine existante<sup>15</sup>. Un monopoleur tient compte de la relation entre  $P$  et  $Y$ , de sorte que la condition nécessaire (6) devient :

$$H_E = Pf_E + YP_Y f_E - W - qf_E = 0, \quad (8)$$

ou

$$P + YP_Y = W/f_E + q. \quad (9)$$

Le monopoleur égalise le revenu marginal,  $P + YP_Y$ , au coût marginal d'extraction plus le coût d'usage marginal. Nous pouvons supposer avec Hotelling (1931) que le taux d'extraction de la ressource est réduit en raison de la « tendance générale » du monopole à retarder sa production. Cependant, Milton Weinstein et Richard Zeckhauser (1975), James Sweeney et Joseph Stiglitz (1975) ont développé des exemples montrant que le monopole peut extraire à un rythme plus élevé que l'entreprise en concurrence parfaite. L'un de ces exemples, parmi les plus explicites, suppose que l'élasticité constante (par rapport aux quantités) de la demande décroît dans le temps. Dans ce cas, le rythme d'exploitation du monopole peut être supérieur à celui de l'entreprise en concurrence parfaite car le monopoleur sait qu'il ne vendra pas beaucoup, ou n'aura pas besoin de ses ressources plus tard, lorsque l'élasticité de la demande sera inférieure à 1. Toutefois, Stiglitz note que l'élasticité de la demande est susceptible de s'accroître plutôt que de décroître lorsque les substituts aux ressources minérales apparaissent sur les marchés. Les autres exemples dépendent d'hypothèses tout aussi irréalistes. Ainsi, il nous est permis de supposer que le monopole aura tendance à conserver les ressources ; John D. Rockefeller et les tenants de la conservation ont donc plus en commun qu'ils ne l'auraient pensé.

## 2. *Exploration*

Nous avons supposé précédemment que tous les dépôts miniers avaient déjà été découverts et qu'il suffisait de les exploiter. Mais, en fait les firmes investissent beaucoup dans l'exploration et il semblerait qu'elles soient encore loin d'avoir découvert tous les dépôts existants. Le fait que l'activité d'exploration soit aussi importante et qu'elle s'apparente à un investissement nous amène à nous demander avec Koopmans (1973), si les ressources non renouvelables ne devraient pas être assimilées à un stock de capital. Bien sûr, le capital peut être accru par l'investissement et sa rareté se manifeste seulement à court terme. En fait, la question est liée à l'importance de l'activité d'exploration. Les effets des politiques gouvernementales et des conditions du marché sur le comportement de l'industrie dépendent beaucoup de la réponse à cette question. Prenons le cas d'un accroissement du taux d'escompte. On a longtemps pensé

15. Si on pose l'hypothèse qu'il existe plusieurs mines toutes détenues par le monopoleur, l'analyse devient plus compliquée mais les résultats restent à peu près les mêmes.

qu'il pouvait susciter des taux d'exploration plus élevés (Ise, 1925). Tel que l'a montré Koopmans (1974), si l'exploration est sans importance, un taux d'escompte élevé accroît le taux d'extraction. Mais, comme l'ont suggéré Paish, Scott et Fisher et Krutella, si l'exploration importe beaucoup, l'accroissement du taux d'escompte décourage l'exploration et peut faire diminuer le taux d'extraction à long terme.

Diverses situations peuvent susciter la recherche de nouveaux dépôts miniers. Un monopole peut le faire dans le but de protéger sa position unique en créant des barrières à l'entrée sur le marché. Morris Adelman (1970, 1972) estime que l'exploration des dépôts nouveaux s'accroît lorsque ceux-ci deviennent aussi attrayants que les dépôts actuellement sous exploitation, ces derniers devenant plus onéreux à exploiter à mesure que leur épuisement s'accroît. Peterson (1975), estime également qu'un inventaire des dépôts existants est nécessaire pour réduire ou contenir les coûts d'extraction. A l'aide d'une simulation, il a pu déterminer le sentier temporel de l'exploration, l'extraction, des réserves et des prix pour une industrie composée de firmes maximisant la valeur actualisée sous diverses hypothèses de politiques fiscales et de conditions de marché <sup>16</sup>. Ainsi, un accroissement du taux d'escompte a pour effet initial d'accélérer l'extraction, mais l'exploration est découragée et la réduction des réserves conduit éventuellement à une baisse du taux d'extraction et à la « surconservation » de la ressource. De tels comportements sont typiques des firmes faisant face à la menace d'expropriation <sup>17</sup>. Dans un autre article, Peterson (1975) évalue l'importance relative de la diffusion de l'information et des problèmes reliés à la propriété commune d'une ressource dans le processus d'exploration et conclut que leur effet est de décourager l'exploration. Les firmes entreprennent moins d'activités d'exploration car elles ne sont pas compensées pour l'information qu'elles procurent aux propriétaires voisins. Dans une approche basée sur la théorie des jeux, Stiglitz décrit le comportement de ces propriétaires, chacun attendant que les autres lui procurent l'information, ce qui conduit à une réduction de l'activité d'exploration et suscite des distorsions dans les schémas de forage (1975). Fixant un prix pour les ressources déjà découvertes et à l'aide du modèle d'Hotelling, Russell Uhler (1975) a estimé le sentier temporel de la maximisation de la valeur actualisée pour l'exploration des champs pétrolifères en Alberta. Il découvre que les niveaux actuels d'exploration sont un peu inférieurs à ses résultats et

16. Il existe une littérature abondante sur la réglementation et la taxation des industries basées sur les ressources extractives que nous ne discutons pas ici faute d'espace. De toute façon, elle ne touche pas beaucoup aux problèmes de rareté à long terme. Voir, Morris Adelman (1972), S. Agria (1969), Gérard Brannon (1975), la société CONSAD (1969), James Cox et Arthur Wright (1975), Alfred Kahn (1960), Stephen McDonald (1963), James McKee (1960) et Peter Steiner (1959).

17. Ngo Long (1975) a examiné le risque d'expropriation. Il conclut que le taux d'escompte est une mauvaise approximation de ce genre de risque.

attribue ce phénomène à l'aversion au risque, reconnaissant cependant que le problème de la diffusion de l'information peut être impliqué, de même que d'autres problèmes reliés à l'information devenant plus apparents lorsque l'incertitude est explicitement considérée dans le modèle.

### 3. *Incertainitude*

Tel que le souligne C. Jackson Grayson (1960), l'exploration est l'une des activités économiques parmi les plus risquées qui soient et l'un des meilleurs exemples de la prise de décision en situation d'incertitude. Il étudie le comportement de neuf petits exploitants dans le secteur du pétrole à l'aide d'un jeu Von Newman-Morgenstern et conclut qu'ils ont une aversion au risque (1960) ; ainsi, du moins pour les petits exploitants, la maximisation des profits anticipés n'est pas une description adéquate du comportement. De plus, il développe des règles de décision et décrit le comportement des firmes individuelles comme l'a fait Gordon Kaufman (1963), à la différence que son approche est plus mathématique.

La localisation, la taille et la qualité du dépôt minier sont des éléments qui restent plus ou moins incertains jusqu'à ce que l'extraction soit complétée. Des outils statistiques raffinés ont cependant été développés pour réduire cette incertitude. Maurice Allais (1957), Kaufman et Uhler et Bradley (1970) formulent des hypothèses sur la distribution de la taille des dépôts de minerais (habituellement log-normale) et sur le processus stochastique qui les génère afin de pouvoir procéder à des évaluations spécifiques. A l'aide d'une analyse statistique multivariée, De Verle Harris (1965, 1966) relie la présence de minerai à une variété de variables explicatives et prédit des découvertes en Arizona et en Utah. Nous examinons ces outils plus loin en relation avec les prévisions de longue période.

Tenant compte de façon explicite de l'incertitude, les motifs de l'exploration peuvent être analysés plus profondément que l'ont fait Adelman et Peterson. Les firmes peuvent entreprendre des activités d'exploration pour des raisons autres que la protection de leur part de marché et la réduction des coûts d'extraction. Richard Gilbert (1975) développe des théories de l'exploration et examine les motifs privés et sociaux de la découverte du minerai et du gain d'information. Il soutient que l'information n'est pas toujours produite de façon optimale. Trop d'information provient souvent de spéculateurs cherchant à prévoir le mouvement futur des prix et trop peu est produite dans le but de prévoir l'épuisement des ressources et d'optimiser les taux d'extraction pour la société. Dans la réalité, les deux cas se présentent et tendent à s'annuler mutuellement. La prédominance de l'un ou de l'autre est une question empirique.

L'incertitude est également au cœur d'une autre activité reliée aux mines : les baux miniers. Lorsqu'une propriété contenant un dépôt minier est sur le point d'être louée, le locataire cherche à savoir ce que le dépôt peut lui rapporter et combien il doit payer pour l'obtenir. Souvent le prix sera déterminé à l'enchère et alors, il doit développer une stratégie d'achat. Une littérature très volumineuse s'est développée sur cette question. Ces modèles sont fonction d'une multitude de facteurs : les acheteurs forment ou non un cartel, les enchères sont ouvertes ou se tiennent à huis clos, le nombre d'acheteurs est ou n'est pas connu au départ, le dépôt a la même valeur pour chacun et cette valeur est connue ou non, chacun détient la même information ou non. Sont également considérés des éléments comme les contraintes individuelles de budget ou les normes préalables de chacun ou encore la stratégie de vente du vendeur s'il en a une. Utilisant divers modèles pour des enchères avec vendeur passif (qui vend au plus offrant) Michael Rothkopf (1969) et Robert Wilson (1975) ont trouvé que le prix de vente anticipé est moindre que la valeur du dépôt, et que le vendeur reçoit une part de la valeur du dépôt qui croît de façon monotone avec l'accroissement du nombre d'acheteurs. Le prix de vente est toujours inférieur à la valeur du dépôt car les acheteurs ne désirent pas acquérir les dépôts sur lesquels leurs estimations (non biaisées) de la valeur sont élevées. Plus il y aura d'acheteurs, plus ils offriront des prix inférieurs à leurs estimations, car leurs estimations personnelles sont susceptibles d'être d'autant plus éloignées de la vraie valeur, qu'ils offrent plus que les autres acheteurs (Capen, Clapp et Campbell, 1971), Oren et Williams (1975). Ce comportement aurait pour effet de faire baisser le prix de vente à mesure que s'accroît le nombre d'acheteurs si ce n'était de l'effet d'échantillonnage : plus il y a d'acheteurs, plus d'offres élevées il y aura, et plus élevée est susceptible d'être l'offre gagnante. En ce qui a trait au cas du pétrole aux États-Unis, D. Gaskins et B. Vann (1975) ont observé que l'offre gagnante s'accroît avec le nombre d'acheteurs.

Ceci indique que le loueur devrait donc avoir une stratégie pour contrôler le nombre d'acheteurs et pour organiser les termes du bail et la méthode de vente. Gaskins et Vann prennent position contre la cartélisation des offres car cela réduit le nombre d'acheteurs. Notons cependant que la cartélisation réduit aussi l'importance du problème de l'aversion au risque. Hayne Leland, Richard Norgaard et Scott Pearson (1974) démontre que l'aversion au risque réduit les offres et retarde le développement des propriétés minières gouvernementales. Les auteurs formulent des politiques de baux miniers qui réduisent l'ampleur du problème en faisant supporter une partie des risques par les gouvernements. Ils optent de plus pour un système de redevances et de profits partagés en dépit des problèmes comptables associés et des distorsions probables dans

les comportements<sup>18</sup>. Par ailleurs, la méthode des bonis actuellement en opération aux Etats-Unis est qualifiée d'inefficace car elle nécessite le versement de sommes trop élevées d'un seul coup de la part des firmes acheteuses. Dans un autre article, Leland (1975) développe ces concepts avec plus de rigueur et s'intéresse au problème de l'assymétrie de l'information entre le gouvernement et les acheteurs — ainsi, le secteur privé aux Etats-Unis connaît mieux les dépôts miniers que le gouvernement américain lui-même. L'aversion au risque peut être réduite en permettant aux firmes de recueillir leur propre information géologique avant la vente des baux de location. Cependant Leland soutient que ceci aurait pour effet de faire diminuer les revenus des gouvernements si les termes des baux prévoient déjà un partage optimal des risques.

L'assymétrie de l'information entre les firmes peut également être la cause d'inefficacités, que l'information soit utilisée pour préparer une stratégie d'achat des baux ou pour spéculer sur les prix futurs du minerai comme dans le modèle de Gilbert. Wilson (1975) et David Hughart (1975) montrent que les locataires éventuels suscitent une information n'ayant aucune valeur sociale lorsqu'ils cherchent à gagner un avantage dans la vente des baux<sup>19</sup>. Si un tel gain est réalisé, les autres acheteurs sont évincés et le gouvernement perd des revenus. Gaskins et Thomas Teisberg attribuent à l'information préalable à la vente une valeur sociale en réduisant les risques, stimulant l'exploration, et assurant une meilleure sélection du locataire. Ils montrent ainsi que dans certains cas, trop peu d'information est générée. Des données empiriques suggèrent que dans le cas de l'exploration *off-shore* à proximité des côtes américaines, trop d'information préalable à la vente a été recueillie. La région a été soumise à 50 fois plus d'études sismiques que la Mer du Nord<sup>20</sup>. Une mesure évidente pour corriger cette situation serait de forcer le partage de l'information géologique, ou de centraliser tout le processus de cueillette et de diffusion. Pour une discussion plus approfondie des politiques de baux miniers, voir Gregg Erickson (1970), Walter Mead (1967), Robert Kalter *et al.*, (Kalter, Stevens et Bloom, 1975 ; Kalter et Tyner, 1975), et le volume de Crommelin-Thompson (1976).

---

18. Les redevances ont souvent pour effet de provoquer la fermeture prématurée des puits de pétrole car ils imposent un écart entre les coûts et les prix marginaux d'extraction. Le département de l'Intérieur des Etats-Unis a mené une enquête récemment et trouva que les firmes abandonnent l'exploration des gisements lorsqu'elles découvrent que ceux-ci ont une valeur espérée négative compte tenu des redevances qu'elles devront payer. Pour une discussion de la terminologie applicable aux baux miniers : bonis, redevances, etc., voir Gregg Erickson (1970).

19. Voir Wilson (1976) pour une discussion des erreurs mathématiques dans l'article de Hughart.

20. Cette information a été fournie verbalement par D. Gaskins du département de l'Intérieur américain. La différence dans l'activité sismique entre les deux zones peut être expliquée par des facteurs géologiques et des différences dans les politiques de location.

Nous avons examiné l'incertitude du côté de l'offre de minerai. Mais, il existe aussi de l'incertitude du côté de la demande puisque la valeur d'une propriété est fonction des prix futurs. Weinstein et Zeckhauser (1975) étudient ce cas et concluent que le comportement des firmes qui sont neutres face au risque n'est pas modifié alors que les firmes ayant une aversion au risque auront tendance à « sous-conserver ». Cette conclusion est fortement reliée au modèle utilisé, duquel l'exploration et l'investissement sont absents.

La demande future est également incertaine car des substituts ou des technologies alternatives peuvent se développer. Partha Dasgupta et Geoffrey Heal (1974) posent l'hypothèse qu'une technologie dont les caractéristiques sont connues sera disponible à une date ultérieure incertaine. Ils observent qu'un accroissement du taux d'escompte est une mauvaise approximation de ce type d'incertitude. Dasgupta et Stiglitz (1975) considèrent le même type d'incertitude mais placent les ressources extractives et les substituts sous divers ensembles d'hypothèses quant au type de propriété : sociale, concurrentielle, monopolistique. Avec au moins un ensemble d'hypothèses <sup>21</sup>, ils trouvent que le monopole diminue le taux d'utilisation de la ressource, et retarde l'introduction du substitut quelle (s) que soit (ent) la ressource ou les ressources qu'il contrôle. Nous décrivons certains travaux empiriques sur les technologies substituts dans la section III F.

#### 4. *Recyclage*

Les matériaux secondaires représentent un ensemble important de substituts aux ressources extractives. La plupart des matériaux non combustibles dans notre économie subissent un certain recyclage. Nous avons mentionné plus tôt qu'aucun matériau ne peut être complètement recyclé et l'énergie n'est pas recyclable du tout. William Schulze (1974) et Weinstein et Zeckhauser (1974) ont ajouté le recyclage aux modèles de ressources extractives et ils concluent, sous certaines réserves, qu'en absence d'effets externes ayant trait à l'élimination de déchets, la maximisation de la valeur actualisée en économie de marché génère le volume optimal de recyclage.

De tels effets externes sont significatifs dans certains cas et non dans d'autres. Dans le cas des déchets solides, les effets externes représentent probablement une faible part du coût total de production, à l'exception

---

21. Dasgupta et Stiglitz supposent une élasticité du prix de la demande constante inférieure à 1. Tel que nous l'avons souligné plus tôt l'affirmation habituelle à l'effet que le monopole retarde sa production peut être contredite en utilisant des hypothèses différentes concernant l'élasticité. Également, le comportement d'une entreprise en concurrence parfaite vendant une ressource extractive est fonction des hypothèses retenues quant au comportement d'un monopole détenant une ressource substitut.



des éléments ayant une faible valeur tels les journaux <sup>22</sup>. Dans le cas de la pollution de l'air et de l'eau, les effets externes sont de toute évidence très importants. Ici, le lien entre l'extraction des ressources extractives et la pollution est très clair. Selon la loi de la conservation de la matière, rien ne se crée, rien ne se perd ; ainsi, lorsqu'un matériau a été utilisé, il doit être recyclé ou retourné à l'environnement, souvent sous une forme indésirable. Le recyclage a donc une double fonction, soit de réduire la pollution et de conserver les ressources.

Kenneth Boulding (1960) rend le lien entre l'extraction de ressources et l'environnement encore plus clair lorsqu'il décrit la terre comme une entité fermée (spaceship earth) où il ne peut y avoir entrée ni sortie de matériau. De même, R. Ayres et Allen Kneese (1969) s'orientent dans cette direction avec leur modèle d'équilibre général incorporant un concept d'équilibre des matériaux.

Pour une discussion plus détaillée de ce type de modèle, voir Fisher et Peterson (1976). Nous devons aussi mentionner ici les travaux de Ralph d'Arge et K.C. Kogiku (1973) qui incorporent l'extraction de ressources naturelles et l'accumulation de la pollution dans un cadre dynamique d'équilibre des matériaux.

#### D. *Le taux d'utilisation optimal*

Dans le modèle précédent, nous avons considéré le comportement de firmes privées ou autres cherchant à maximiser la valeur actualisée d'une ressource. Des études récentes adoptent une approche différente. Elles posent l'hypothèse qu'un planificateur cherche à maximiser une fonction de bien-être social plus générale. Kent Anderson (1972) introduit une ressource non renouvelable comme intrant à la production dans un modèle néo-classique de croissance optimale et maximise la consommation per capita actualisée. La quantité de ressources nécessaire pour produire une unité de bien final varie seulement de façon exogène avec le temps, de sorte que l'utilisation des ressources ne peut varier qu'avec la production de biens finaux. Ainsi, le rapport capital/main-d'œuvre optimal est moindre lorsqu'on tient compte de la conservation des ressources que lorsqu'on la néglige. Prem Garg et Sweeny (1974) traitent les ressources non renouvelables de la même façon à l'aide d'une fonction de production Cobb-Douglas et montrent que les conclusions d'Anderson dépendent des élasticités des fonctions de production et d'utilité. Neil Vousden (1973) considère une ressource non renouvelable comme seul intrant à la production. Avec une productivité marginale décrois-

---

22. Toutefois, il est possible que le recyclage ne coûte pas tellement plus que l'extraction d'une ressource nouvelle de sorte qu'un effet externe de petite dimension occasionnerait un changement très important dans la quantité de la ressource recyclée. La génération actuelle peut ne pas se préoccuper de ceci mais les générations futures préféreront sûrement le recyclage.

sante et une fonction d'utilité concave actualisée, il montre que le taux d'épuisement est optimal lorsque l'utilité ne dépend que de la consommation, mais peut ne pas l'être lorsque le stock de ressources est introduit dans la fonction d'utilité pour refléter des motifs de conservation. L'hypothèse-clé de ce modèle est l'existence d'une utilité marginale finie pour chaque niveau de consommation. De toute évidence, l'épuisement ne sera jamais optimal sous l'hypothèse plus réaliste que l'utilité marginale de la consommation tend vers l'infini quand la consommation tend vers zéro. D'autres auteurs étudient également cette question : Martin Beckman (1974), Dasgupta et Heal (1974), A. Ingham et P. Simmons (1975) et Stiglitz (1974). Ils déterminent les conditions sous lesquelles des programmes optimaux et des états d'équilibres stables existent, et dérivent les propriétés des sentiers optimaux ; par exemple, y aura-t-il épuisement et l'extraction recommence-t-elle après avoir été momentanément interrompue ? Bien sûr, ces propriétés sont fonction des paramètres et des hypothèses particulières des modèles.

Etant donné que la société ne peut probablement pas réaliser les sentiers temporels qui maximiseraient une fonction de bien-être généralisée, il reste à s'interroger sur la confiance qu'on peut accorder au marché dans la réalisation de cette tâche. Quelles sont les caractéristiques, bonnes ou mauvaises, des sentiers temporels suscités par des producteurs et des consommateurs qui maximisent la valeur actualisée ? Il est bien connu qu'un équilibre concurrentiel de ces agents est Pareto-optimal en l'absence des imperfections de marché habituelles (Malinvaud, 1953). Mais l'extension de ce résultat au cas des ressources naturelles a toujours suscité des difficultés. Hotelling (1931) a montré que les firmes minières maximisant la valeur actualisée maximisent aussi la valeur actualisée du surplus du consommateur et du producteur. Mais, il exprime aussi des doutes quant à l'empressement des firmes à répondre aux attentes de la société en regard des ressources naturelles, et critique les bénéfices inattendus réalisés par les firmes pouvant disposer gratuitement de l'information relative à l'exploration.

Richard Gordon (1967) soutient qu'une solution de marché en concurrence parfaite n'est pas nécessairement efficace car les producteurs peuvent ne pas égaliser les coûts d'extraction marginaux de chaque gisement sous exploitation. Olivier Goldsmith (1974) fait cependant remarquer que cette condition ne sera normalement pas nécessaire si le coût d'usage varie d'une mine à l'autre.

Dans son examen des théories des ressources épuisables, Robert Solow souligne les conclusions de Hotelling mais exprime des doutes sur le fonctionnement des marchés futurs, la formation des anticipations de prix et la transmission des dotations de bien-être aux générations futures (1974).

William Nordhaus (1973) et Stiglitz s'inquiètent de la myopie dans la prise de décision et de l'instabilité des prix.

Les imperfections sont certainement des éléments courants des marchés des ressources naturelles, surtout lorsque l'hypothèse de prévision parfaite est laissée pour compte. Cependant, il ne faudrait pas affirmer trop rapidement qu'elles sont susceptibles d'accélérer l'extraction et de mettre en danger le bien-être des générations futures. Tel que nous l'avons souligné plus tôt l'incertitude tend à décourager l'exploration et le développement des sources nouvelles, et le monopole tend normalement à retarder l'extraction. En longue période, le résultat net de ces imperfections pourrait être de conserver les ressources des générations futures, bien que leur bien-être peut ne pas être nécessairement accru. Cette question est très importante et mérite une étude plus approfondie.

#### *E. Transmission du bien-être entre générations*

Si les industries extractives sont efficaces, quelles sont les implications pour le bien-être des générations futures ? Ceci ne signifie pas que leur bien-être est maximisé ou que le nôtre l'est. De la même façon que l'efficacité ne nous renseigne nullement sur la distribution sociale optimale des revenus chez nos contemporains, elle fait abstraction de la répartition des revenus entre générations. D'autre part, le comportement de l'industrie extractive en marché libre est tout à fait conciliable avec la maximisation d'une fonction de bien-être social : l'industrie réalise exactement ce qu'un maximisateur de bien-être s'attendrait de lui, comme le démontre Sweeney.

Mais demandons-nous d'abord quel type de fonction objective est appropriée dans de telles circonstances. En raisonnant en utilitaristes, nous maximiserons probablement une intégrale ou la somme des utilités présentes et futures comme dans les modèles de croissance néo-classique. Mais plusieurs questions restent sans réponse. Devrions-nous actualiser l'utilité ? Frank Ramsey (1928) et d'autres croient que non. Mais alors, il se peut qu'aucun optimum existe. Avec ou sans actualisation, comment pouvons-nous justifier de réduire le bien-être d'une génération seulement parce que le gain net échéant à une autre génération contribue davantage à l'objectif qu'il n'en retranche ? Etant donné l'ampleur de ces problèmes, l'approche radicale de John Rawls (1971), un philosophe, peut sembler attrayante. Ainsi, il édicte des règles de justice distributive basées sur une négociation hypothétique entre les générations. Si toutes les générations pouvaient se rencontrer, dit-il, elles adapteraient sûrement un critère du type « max-min » de sorte que le bien-être social serait égal au niveau d'utilité de la génération la moins bien nantie. Solow (1974) applique ce critère à des modèles de croissance néo-classiques portant sur les ressources non renouvelables et conclut que ses implications sont raison-

nables dans certains cas et non dans d'autres. Un exemple de ces derniers nous est fourni par le cas d'un stock de capital initial peu élevé. Si la première génération est la moins bien nantie, comme on pourrait le supposer, le critère prescrit de ne pas accumuler de capital, car cela nécessiterait des sacrifices supplémentaires de la part de la génération la moins bien nantie. Toutefois, Edmund Phelps et John Riley (1974) montrent que le critère max-min n'exclut pas toujours la croissance, particulièrement lorsque nous retirons de l'utilité du bien-être des générations futures <sup>23</sup>.

Cette procédure d'optimisation du bien-être est certes très intéressante mais son application est très limitée par le manque de contrôle gouvernemental sur les générations présentes et futures. Un secteur extractif concurrentiel est efficace et s'accorde avec la maximisation du bien-être seulement si le taux d'épargne et tous les secteurs de l'économie sont présentement efficaces et continueront de l'être dans l'avenir. Mais comment un gouvernement peut-il forcer les générations futures à réaliser ses objectifs ? Les gouvernements transmettent des lois, des constitutions, des dettes et engagent de diverses façons les générations futures, mais au-delà de ces considérations, les gouvernements futurs font plutôt ce qu'ils veulent, ou ce que la population désire. Même dans le cas de la génération présente, le gouvernement manque de contrôle, particulièrement en ce qui a trait au taux d'épargne. Tel que l'a montré Simon Kuznets, le taux d'épargne est resté à peu près le même au cours des 100 dernières années aux États-Unis malgré de nombreuses fluctuations dans les politiques gouvernementales. A moins d'être en position de dictature, un gouvernement pourrait difficilement rester au pouvoir s'il essayait de modifier le comportement de ses constituants en matière d'épargne.

Comme alternative, les planificateurs gouvernementaux peuvent simplement reconnaître les limites de leur contrôle et adopter un comportement satisfaisant plutôt qu'optimal. Si les personnes n'épargnent pas suffisamment et, par conséquent, ne laissent pas suffisamment de ressources pour les générations futures, les planificateurs peuvent souhaiter intervenir dans le secteur des ressources non renouvelables et forcer une conservation accrue, même si les générations futures pourraient préférer du capital renouvelable. Mais cela n'est pas une façon efficace de transmettre le bien-être aux générations futures et, bien sûr, la génération présente peut rendre difficile le contrôle de ce secteur.

Dans ces circonstances le planificateur frustré peut devoir céder le contrôle complet du bien-être futur à la génération présente même s'il partage le manque de confiance de Arthur Pigou (1932) dans la généra-

---

23. Dasgupta (1974) explore divers concepts d'équilibre de la théorie des jeux en plus des concepts max-min. Certains équilibres sont inefficaces dans le temps ou Pareto-inefficaces. D'autres sont des ensembles vides, et d'autres correspondent à l'ensemble des programmes d'accumulation Pareto-efficaces.

tion présente sur cette question. Toutefois, la génération présente sera, elle aussi, confrontée à de multiples problèmes. Elle sera également troublée par le manque de contrôle. Krutilla et Fisher considèrent le cas où, par exemple, la génération présente, sachant qu'elles en feront bon usage et ne les mutileront pas, voudrait bien transmettre les Montagnes Rocheuses aux générations futures. Mais étant donné que la première (présente) génération ne peut pas obliger la seconde à protéger l'environnement pour la transmettre à la troisième génération, elle choisira peut-être de ne pas la protéger même si elle-même ainsi que les générations futures en profiteraient.

Stephen Marglin (1963) examine une inefficacité que le gouvernement peut tenter d'éliminer. Il pose que les transferts aux générations futures sont des biens collectifs dont jouissent tous et chacun. Comme n'importe quel bien collectif, le bien-être futur nécessite l'intervention de l'Etat pour être produit de façon optimale. Avec l'approbation de ses constituants, le gouvernement peut agir de façon à ce que plus de ressources naturelles soient laissées aux générations futures que dans une situation où aurait prévalu le laisser-faire.

Supposons que nous voulions aider les générations futures, et demandons-nous quel serait le meilleur moyen d'y parvenir ? Malheureusement, nous ne savons pas quel type d'actif sera le plus en demande dans l'avenir. Certains croient que nous devrions augmenter le stock de capital renouvelable, alors que d'autres pensent que les générations futures préféreront plus de ressources naturelles et d'environnement de qualité. Nous avons tendance à croire que cette dernière possibilité correspond le mieux aux attentes des générations futures pour des raisons discutées ailleurs en détails (Fisher et Peterson, 1976).

Dans ce contexte se pose également la question des effets de diverses actions privées et publiques sur le bien-être des générations futures. Nous pouvons tenter d'y répondre en faisant un parallèle avec la situation contemporaine. Ainsi, tout comme nous constatons que les individus avec des revenus élevés profitent plus que les autres des facilités portuaires pour les bateaux de plaisance, il est possible que les quelques prochaines générations bénéficient mais que toutes les autres générations futures souffrent de surrégénérateur. Dans ces circonstances, la génération actuelle serait en meilleure position pour prendre des décisions concernant l'avenir bien que cela peut ne pas nécessairement bénéficier aux générations futures.

#### F. *Nos ressources s'épuisent-elles ?*

Diverses questions empiriques émergent de la théorie des ressources non renouvelables. Le coût d'usage est-il important, ou, les firmes l'ignorent-elles simplement parce qu'il est trop peu élevé ? (Gordon,

1967). Se présentent alors l'ensemble des questions touchant l'optimalité du comportement des firmes et de l'industrie. En particulier, il n'est pas certain que l'effet net du taux d'utilisation des ressources extractives soit d'accroître ou de diminuer le taux d'actualisation auquel font face les firmes minières. Mais, de toute évidence, la question principale reste la suivante : Dans combien de temps nos ressources se seront-elles épuisées ? Il serait difficile de nier que les ressources s'épuisent dans le sens physique du terme. Les mines deviennent plus profondes, les filons diminuent, la teneur est moins élevée, et les coefficients de succès dans l'exploration se détériorent. Mais, faisons-nous face à un épuisement des ressources dans le sens économique du terme ? Les prix et les coûts réels des biens à base de ressources naturelles s'accroissent-ils ? Les progrès technologiques, la production et les substitutions de facteurs ont-ils plus que compensé l'épuisement physique des ressources naturelles ?

Il s'agit d'un problème très complexe car la mesure idéale de rareté n'a pas encore été développée. Est-ce que ce devrait être le coût d'extraction en termes réels tel que le suggèrent Barnett et Morse (1963) ? Cet indice présente le désavantage de ne pouvoir être observé directement. De plus, tout indice incorpore généralement un mécanisme de pondération et de dégonflement des prix plus ou moins arbitraire (Smith, 1974). Un autre problème souligné par Nordhaus (1973) est que le coût d'extraction ne tient pas compte du coût d'usage et qu'il peut en conséquence être très faible même si un stock est presque complètement épuisé. Notons, cependant, que généralement les coûts s'accroissent dans de telles circonstances. Dans son étude, Nordhaus traite plutôt du cas, assez improbable, où  $f_x = 0$ , et où le coût d'usage croît à un taux égal au taux d'actualisation. Dans ce cas, le coût d'usage marginal peut devenir beaucoup plus élevé que le coût d'extraction quand on s'approche de la date de l'épuisement complet.

De toute évidence, il faut considérer le coût d'usage car il reflète les coûts futurs de l'extraction présente ; mais il ne constitue pas en soi une mesure appropriée de la rareté. Il est encore plus difficile à observer que le coût d'extraction, répond à des anticipations erronées, et ne se déplace dans aucune direction particulière lorsque le stock de ressources s'épuise. Le coût d'usage sur un gisement particulier peut s'accroître pendant une certaine période de temps, mais habituellement il tend vers zéro à mesure que l'épuisement progresse vers le point où le coût d'extraction minimal s'approche du prix du marché<sup>24</sup>. Si les ressources mondiales deviennent une masse épuisée et homogène, les rentes et les coûts d'usage disparaîtront ; aucune ressource ne sera plus attrayante qu'une autre.

24. L'écart que constitue le coût d'usage marginal entre le prix et le coût marginal d'extraction accélère l'abandon et gaspille les ressources des mines ou des puits à la veille d'être complètement épuisés.

Comment se comporte alors le prix du marché ? Il présente l'avantage d'être facile à observer et il reflète à la fois le coût d'usage et le coût d'extraction. Son principal désavantage est d'inclure la rente du monopoleur et des composantes volatiles de spéculation. Dans une étude sur les coûts du cuivre, O. Herfindahl (1959) s'est vu forcé de corriger ses données pour tenir compte de la rente du monopoleur, afin de déterminer les tendances à long terme des coûts du cuivre à partir des données sur les prix, et de la même manière personne n'irait soutenir que les prix actuels du pétrole ont beaucoup à voir avec les coûts de l'extraction. Un débat s'est également engagé sur le type de numéraire à utiliser pour de telles comparaisons de prix relatifs (Brown et Field, 1975).

Il est toutefois assez surprenant, compte tenu de ces difficultés, que la plupart des données dégagent des conclusions similaires ; nous ne faisons pas face à un épuisement dans le sens économique du terme. A l'aide de données sur les intrants de main-d'œuvre et de capital par unité de production pour la période 1879-1957, Barnett et Morse ont testé « l'hypothèse forte de rareté » à l'effet que le coût réel (main-d'œuvre et capital) des biens à base de ressources extractives s'accroît, et « l'hypothèse faible » à l'effet que le coût des biens à base de ressources extractives s'accroît par rapport aux coûts des biens qui ne sont pas basés sur cette catégorie de ressources. Les deux hypothèses sont rejetées pour tous les biens à l'exception des produits de la forêt. Ils ont obtenu des résultats similaires, mais légèrement moins significatifs, en utilisant des données sur les prix compilés par Neal Potter et Francis Christy (1962). Un certain nombre d'études tendent à confirmer les résultats de Barnett et Morse. Herfindahl (1959, 1961) ne trouve pas de tendance à la hausse dans les coûts réels du cuivre et des autres métaux ; Harold Barger et Sam Schurr (1974) observent un accroissement de la productivité des exploitations minières excédant celui de la fabrication sur la période 1899-1939 ; et Nordhaus (1974) étudie onze métaux et trouve que leurs prix ont baissé par rapport au prix du facteur main-d'œuvre depuis 1900. En termes du modèle présenté ci-haut, le coût marginal d'extraction,  $W/f_E$ , a été réduit sous l'effet du progrès technologique à un point tel que, peu importe le coût d'usage marginal,  $q$ , le prix du marché,  $P$ , est tombé. Au niveau micro, il existe beaucoup de données confirmant que des progrès technologiques ont eu lieu dans le secteur minier. Les machines ont remplacé les hommes et les animaux, et des minerais de teneur inférieure ont pu être récupérés (Corry et Kiessling, 1938 ; Peirce, 1974). Le progrès technologique a été soutenu par la substitution du capital et de la main-d'œuvre aux ressources naturelles, et d'un matériau à un autre (Nathan Rosenberg, 1973 ; David Humphrey et John Moroney, 1975).

Seuls quelques problèmes demeurent. L'un d'eux est la conclusion de V. K. Smith (1974) à l'effet que le taux de décroissance

de certains prix des ressources extractives a lui-même diminué. Un autre problème est que toutes ces études négligent les coûts en terme d'environnement de l'extraction des ressources, de leur transport et de leur traitement. Il est possible que ces derniers aient augmenté suffisamment pour compenser la baisse des coûts du marché. Nous considérons plus en détails cette question ailleurs (Fisher et Peterson, 1976). Un troisième problème est le haut degré d'incertitude quant à l'offre et à la demande de ressources extractives, ce qui rend hasardeux toute extrapolation directe des résultats de l'étude Barnett-Morse dans l'avenir.

Notons que la perpétuation des tendances encourageantes observées par Barnett et Morse et les autres auteurs cités dépend de la substitution des produits et des facteurs, des changements technologiques, et des économies d'échelles. Pourrions-nous croire que ces ajustements vont continuer de se produire ? Et, pour combien de temps ? Ou encore, est-ce que les tenants de la thèse *Halte à la croissance* pourraient avoir raison de voir dans les crises de l'énergie et de l'alimentation des phénomènes indiquant que l'économie mondiale se heurte aux limitations imposées par les stocks des ressources naturelles. Cette thèse a été critiquée par W. Beckerman (1972), Nordhaus (1973) et d'autres pour avoir négligé les prix et pour n'avoir pas suffisamment exploité les données.

L'omission des prix affaiblit considérablement les prédictions contenues dans *Halte à la croissance*. On y suppose que l'économie mondiale va se heurter à l'épuisement des ressources sans qu'au préalable les prix n'augmentent pour stimuler la recherche de nouveaux gisements, de matériaux substituts et de meilleures méthodes de conservation. D'autre part, rien ne nous permet de croire que le comportement des coûts et des prix sera le même au cours du siècle à venir qu'au cours du siècle passé : l'œuvre de Smith nous porterait en fait à croire le contraire. Il nous faut des méthodes économétriques de prévision plus sophistiquées. Nous résumons dans ce qui suit les développements de prévisions de longue période en matière de minerais depuis la dernière guerre mondiale, pour finalement proposer quelques améliorations d'ordre méthodologique.

La plupart des premières études, par Dewhurst (1975), Barnett (1950), la Paley Commission (1952), Schurr et Netschert (1960), Netschert et Landsberg (1961), Landsberg, Fischman et J. Fisher (1963), ont fait des projections de la demande future à partir des utilisations observées dans les différents secteurs de l'économie, pour ensuite comparer ces projections aux disponibilités anticipées afin de déceler les écarts possibles. La méthodologie utilisée dans ces études s'inspire des travaux de Wassily Leontief (1941) sur les modèles interindustriels, méthodologie qui fut développée par Barnett (1950). Mais la première étude à avoir utilisé un modèle interindustriel complet semble être celle



de Ronald Ridker *et al.* (1972), qui font des prévisions des demandes de minerai pour les comparer aux réserves estimées.

Nous devons mentionner tout particulièrement l'étude de la Paley Commission qui a su prédire les problèmes actuels avec les pays producteurs de minerai, et qui a su mettre l'accent sur le fait que les réserves de minerai ne sont pas des quantités géologiquement fixes mais sont, au contraire, fortement dépendantes des prix, de la technologie, des découvertes et de la localisation des marchés. Nous ne devons pas oublier cette caractéristique des réserves quand on nous dit, qu'au taux de consommation actuel, il ne nous reste que pour 20 ans de pétrole ou 50 ans de minerai de fer. Les réserves de pétrole, par exemple, devraient effectivement être plus élevées à \$12 le baril qu'à \$4. Il ne serait pas plus rationnel pour une entreprise d'engager des ressources pour découvrir l'équivalent de 200 ans de molybdène, par exemple, qu'il ne le serait de garder un inventaire de plusieurs années de pièces de rechange pour une machine.

Les prix ne sont pas inclus comme variables endogènes dans les modèles pré-cités. On y prédit les changements de prix de façon très grossière, en comparant simplement les quantités projetées pour l'offre et la demande. De toute évidence, il serait préférable d'estimer des fonctions d'offre et de demande pour les biens à base de minerais avec les prix comme variables explicatives endogènes. Il existe quelques travaux récents en ce sens, travaux suscités probablement par la crise de l'énergie et par les besoins analytiques de l'Administration Fédérale de l'Énergie (FEA) américaine. Edward Hudson et Dale Jorgenson (1974) ont estimé des fonctions de demande d'énergie aux Etats-Unis pour l'année 2000 à l'aide d'un modèle de croissance macro-économique, un modèle interindustriel à neuf secteurs et un modèle de consommation. Paul MacAvoy et Robert Pindyck (1975) ont estimé des fonctions de demande et d'offre désagrégées pour le gaz naturel à l'aide d'un modèle détaillé de l'exploration, de l'extraction et de la structure de l'industrie.

Mais, il n'existe toujours pas de modèle d'optimisation du comportement à long terme tel que celui décrit dans la section II A. Les modèles de contrôle optimal sont difficiles à résoudre et à analyser dans les cas concrets qui impliquent une multitude de variables et de contraintes d'inégalité. Plusieurs hypothèses délicates doivent être formulées afin d'obtenir des estimations empiriques, tel que le montre l'étude de Heal (1975). Il est particulièrement difficile d'introduire les anticipations de prix. Ainsi, il n'est pas surprenant que les modèles de programmation linéaire ou d'autres modèles reliés soient utilisés pour décrire les comportements dans des cas concrets ; on peut facilement manipuler, avec l'algorithme du simplex, un grand nombre de variables et de contraintes d'inégalité. En faisant une hypothèse sur l'évolution de la demande énergétique aux Etats-Unis, Nordhaus (1973) utilise la programmation linéaire pour

déterminer la méthode d'approvisionnement la moins coûteuse en terme de valeur actualisée. Le prix fictif de chaque ressource énergétique correspond au coût d'usage marginal. Fait à noter, le prix fictif diminue au fur et à mesure qu'apparaissent des ressources dont le coût est plus élevé, mais qui sont aussi plus abondantes. Dans la solution optimale, l'énergie épuisable à bas prix est utilisée jusqu'à ce que le prix atteigne le niveau de la source ultime, non épuisable, comme par exemple, la fusion contrôlée. La présence de cette technologie limite (back stop technology) empêche les prix d'augmenter indéfiniment.

La nature ou la date de disponibilité de la technologie alternative est souvent incertaine comme nous l'avons déjà souligné. Alan Manne (1974) analyse cette incertitude numériquement en permettant à la date de disponibilité du surrégénérateur de varier de façon aléatoire et en calculant la combinaison optimale de la capacité électrique aux Etats-Unis à l'aide de programmes linéaires séquentiels. Les décisions sur la capacité présente que suggère le modèle ne sont pas très sensibles à la date de disponibilité, indiquant peut-être que la recherche pour accélérer les développements de cette technologie et réduire l'incertitude n'est pas très importante.

Le modèle le plus sophistiqué, incorporant les développements nouveaux de la modélisation des problèmes énergétiques, est celui de l'Administration fédérale de l'énergie (FEA) (1974). Il combine un modèle de la demande semblable à celui de Hudson et Jorgenson à un modèle de l'offre semblable à celui de Nordhaus ou Manne. Il peut projeter l'offre, la demande et les prix de l'énergie aux Etats-Unis jusqu'en 1985 et simuler les effets des politiques. Il nous semble remarquable qu'un tel effort ait été réalisé par une agence de contrôle devant faire face à des décisions de politiques au jour le jour. Même si tous les preneurs de décisions n'y croient pas ou ne le comprennent pas, ce modèle aura au moins permis de faire avancer l'art de la prévision.

Mais où cela nous conduit-il ? Comment pouvons-nous améliorer nos prévisions sur les biens à base de minerais ? Une façon de le faire serait d'introduire une meilleure information géologique dans nos modèles. Lorsque Ridker et ses associés ont comparé les prévisions de demande de minerais aux réserves, ils ont réalisé que les estimations de réserves pouvaient être erronées. Les réserves peuvent ne pas être reliées à la quantité de minerai qui sera finalement disponible. Tel que nous l'avons souligné, le prix est une variable importante influençant les estimations de réserves. Un minerai tel que l'aluminium peut devenir très abondant si son prix double alors que le prix d'un autre minerai, tel que le tungstène, peut devoir augmenter beaucoup plus avant que les réserves potentielles ne soient modifiées.

A la recherche d'une meilleure mesure de la disponibilité véritable Nordhaus (1974) examine l'indice de « l'abondance de la croûte » qui est la quantité totale d'un minerai sous la croûte terrestre. Cependant, il croit que cette mesure est trop optimiste et préfère les estimés des « ultime recoverable resources » préparées par le « U.S. Geological Survey » (1973). Il semble que nous devrions dans l'avenir pénétrer dans le champ de compétence du géologue pour améliorer nos prévisions d'offre de minerais à long terme.

Tel que nous le suggérons dans la section III c 3, les géologues disposent d'outils statistiques sophistiqués pour prévoir l'occurrence des dépôts miniers. En fait, il existe une grande quantité de données et de techniques géologiques. Les distributions tonnage-teneur indiquant la quantité d'un minerai disponible selon diverses échelles de qualité ou de taille des dépôts sont des éléments clés pour déterminer les quantités disponibles à différents prix. David Brooks (1967) fournit de telles informations pour le plomb et le zinc ; Donald Singer, Dennis Cox, et Lawrence Drew (1975) en fournissent pour les dépôts de cuivre ; et Kaufman (1963) estime la distribution de la taille des réservoirs de pétrole.

De telles informations rendraient beaucoup plus fiables nos modèles et faciliteraient les projections à long terme. Nous pourrions supposer que les agents économiques détiennent suffisamment d'informations géologiques pour former une distribution tonnage-teneur comme celle du diagramme 5, exploitant d'abord les dépôts les plus riches et provoquant une baisse monotonique dans la teneur du minerai extrait<sup>25</sup>. La surface sous la courbe représente la dotation initiale en minerai,  $X_0$ , ou « l'abondance de la croûte », et la surface ombragée représente l'extraction

cumulée,  $\int_0^t Y(r)dr$ . Cette approche est semblable à celle de Her-

findahl (1959). Philip Musgrove (1971) l'utilise pour analyser le cas de 11 minerais. Peterson (1972) a montré que, dans le cas de l'Afrique du Sud, le coût d'extraction est intimement relié à la teneur du minerai

25. La distribution du diagramme 5 peut sembler très simplifiée car elle couvre une seule variable, une seule teneur et elle est uniforme. Une distribution plus réaliste serait multivariée et considérerait la taille des dépôts, la profondeur et d'autres variables qualitatives. En ce qui a trait à l'uniformité, certains auteurs ont suggéré que le cuivre, par exemple, est moins abondant pour des teneurs juste inférieures à celles qui sont couramment extraites (Singer, Cox, 1975). Ceci suggère donc l'existence d'une bosse sur la queue de la distribution. La plupart des analystes s'entendent pour soutenir que la distribution est plus élevée dans le voisinage des teneurs moyennes de la croûte. Il existe beaucoup de matériaux de teneur inférieure mais avant que nous ayons exploité ces « teneurs moyennes » nous ferons peut-être face à des contraintes énergétiques et environnementales.

extrait. Henry Steele (1974) a démontré la relation entre les coûts, les découvertes cumulatives et la production, d'une manière qui laisse croire à un déplacement le long d'une distribution tonnage-teneur. M. King Hubbert (1969) fournit des données qui confirment cette relation pour le pétrole. En réalité, les agents économiques ne détiennent pas suffisamment d'information pour éviter les découvertes surprises et pour exploiter les meilleurs dépôts restants en tout temps. Mais l'hypothèse de monotonie peut être raisonnable car la teneur moyenne du cuivre extrait aux Etats-Unis a diminué d'une façon soutenue passant de 4.0% en 1900 à 0.60% en 1970 (Cox *et. al.*, 1973). De toute façon, la surprise exploratoire peut être facilement introduite comme élément stochastique dans les modèles.

Les économistes utilisent déjà des informations géologiques, ou relevant du génie minier, dans leurs modèles, et récemment cette tendance s'est très fortement accentuée. Netschert (1958) utilise la profondeur des champs et le rapport pétrole-gaz dans ses prévisions de réserves de pétrole. Franklin Fisher (1964) explique les coûts de forage du pétrole par la profondeur des puits et examine l'effet du prix sur le volume de nouvelles découvertes. Lorsque les prix augmentent, la quantité de pétrole s'accroît plus lentement que le nombre de champs car les champs marginaux sont plus petits. Mac Avoy et Pindyck (1975) utilisent l'approche de Fisher, de même que certains résultants de Kaufman, pour formuler leur modèle de gaz naturel. Bradley (1967) utilise la distribution de la taille des réservoirs de pétrole et le taux de décroissance de la production des réservoirs pour projeter les réserves de pétrole et les coûts à long terme. Robert Kuller et Cummings (1974) incorporent les taux de décroissance et d'autres informations relevant du génie minier à un modèle de développement et d'extraction optimale des réserves de pétrole. Comme dans le cas des ressources renouvelables, les économistes peuvent et devraient entreprendre des études multi-disciplinaires.

## V. CONCLUSIONS

Que pouvons-nous conclure quant à l'état de nos connaissances sur les ressources naturelles ? Toute tentative de réponse à cette question pourrait paraître présomptueuse. Cependant, nous avons effectué une vaste recherche sur la question et nous pensons pouvoir apporter quelques éléments de réponse. A l'heure actuelle, aux Etats-Unis et ailleurs dans le monde, des choix sociaux sont effectués ou sur le point de l'être, tels que ceux concernant le développement des ressources énergétiques. Ces choix impliquent des investissements de plusieurs milliards de dollars et auront des effets très importants sur le stock de ressources naturelles et l'état de l'environnement. En quoi notre examen de la littérature peut-il aider à mieux situer le rôle des économistes dans le contexte ? Et, peut-

être plus important encore, quelles sont les faiblesses de nos connaissances actuelles ? Dans ce qui suit, nous offrons quelques conclusions préliminaires en commençant par les aspects positifs.

Il semble évident que les préoccupations relatives aux ressources naturelles en tant que limites à la croissance n'ont pas débuté avec la publication de l'étude du Club de Rome et qu'elles continuent d'être largement débattues. Depuis Malthus, sinon avant, les économistes ont étudié la possibilité d'un épuisement des ressources. Depuis Mill, ils se sont également préoccupés de la qualité de l'environnement. Au cours des années 1960, la relation entre l'extraction des ressources et la production de résidus a été explicitée par le modèle de l'équilibre des matériaux, lequel part du principe que rien ne se perd rien ne se crée dans les processus économiques de la production et de la consommation.

En ce qui a trait au secteur de l'extraction plus particulièrement, deux conclusions majeures découlent de la théorie et des données empiriques. Premièrement, les ressources extractives sont probablement allouées par les marchés concurrentiels aussi efficacement que les autres ressources et subissent également les contrecoups des imperfections habituelles. Deuxièmement, bien que les stocks s'épuisent dans le sens physique du terme, les changements technologiques, les économies d'échelle, et la substitution des produits et des facteurs ont grandement contribué à ralentir l'érosion de la base des ressources de l'économie. Au contraire, il semble que les biens fabriqués à partir de ressources extractives sont devenus moins rares, en termes des sacrifices nécessaires pour les obtenir, au cours des cent dernières années.

Toutefois, il faut nuancer quelque peu ces conclusions plutôt optimistes. D'un point de vue théorique, un problème se présente si la ressource est de propriété commune, comme dans l'exploitation de pêche. Il faut alors imposer ou bien un régime de propriétaire unique ou un contrôle central pour éviter que la libre entrée résulte en une sur-exploitation. Il faut cependant bien choisir ces contrôles. Une conclusion importante de l'analyse est que la production soutenue maximale, souvent recommandée par les chercheurs du domaine des sciences naturelles et incorporée dans diverses lois et traités, ne constituerait pas généralement un taux d'exploitation efficace. Le coût d'usage marginal, qui représente l'effet de l'extraction aujourd'hui sur la valeur actualisée d'un stock de ressources, pose un autre problème particulier aux ressources extractives. Lorsqu'il décide du taux d'extraction de la période courante, le gestionnaire de la ressource égalise le coût marginal d'extraction au prix moins le coût d'usage marginal. Cependant le coût d'usage est fonction des anticipations sur les prix et les coûts futurs, ce qui peut conduire à de mauvaises décisions d'extraction. Également, il importe de noter que dans un marché oligopolistique, tel que celui du marché mondial du pétrole,

la différence entre le prix et le coût marginal d'extraction ne s'explique pas entièrement par la rente monopolistique. L'ampleur et l'importance du coût d'usage dans diverses situations soulèvent également un problème empirique très important.

Du côté empirique, beaucoup de gens se préoccupent de la possibilité que les prix relatifs des métaux et du pétrole aient diminué moins rapidement au cours des dernières années, mis à part le bond prodigieux des prix de l'énergie au cours des deux ou trois dernières années. Un autre point à souligner est que les données sur les coûts et les prix n'ont pas tenu compte des coûts *externes* de l'extraction, du transport et de la transformation des ressources. Nous savons que le développement des ressources énergétiques, par exemple, suscite des coûts substantiels en terme d'environnement, et que ces coûts ne se reflètent pas dans les coûts et les prix de production de l'énergie. Il est probable qu'une étude statistique du comportement dans le temps des coûts sociaux des ressources extractives indiquerait une baisse beaucoup moins importante que celle notée précédemment. Ou, en d'autres termes, les économies apparentes dans la production des ressources extractives ont été réalisées en partie grâce à l'utilisation non comptabilisée des ressources de propriété commune que sont l'air et l'eau. Finalement, les grandes incertitudes quant à l'offre et à la demande future de ressources rendent hasardeuses les extrapolations simples dans l'avenir des tendances passées, que ces tendances soient encourageantes ou non.

Pour dissiper ces craintes, il serait nécessaire de détenir des prévisions à long terme, élaborées à partir de données et de techniques géologiques. Enfin, les ressources renouvelables et non renouvelables offrent aux économistes une occasion de réaliser des recherches multi-disciplinaires audacieuses et fort utiles.

Frederick M. PETERSON

et

Anthony C. FISHER,  
*Université du Maryland.*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ADELMAN, M.A. « Economics of Exploration for Petroleum and Other Minerals, » *Geoexploration*, 1970, 8, pp. 131-50.
2. ADELMAN, M.A. *The World Petroleum Market*, Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1972.
3. AGRIA, S.R. « Special Tax Treatment of Mineral Industries, » in *Taxation of Income from Capital*, edited by A.C. Harberger and M.J. Bailey, Washington : The Brookings Institution, 1969.
4. ALLAIS, M. « Method of Appraising Economic Prospects of Mining Exploration Over Large Territories : Algerian Sahara Case Study, » *Management Sci.*, July 1957, 3, pp. 285-347.
5. ANDERSON, K.P. « Optimal Growth When the Stock of Resources is Finite and Depletable, » *J. Econ. Theory*, April 1972, 4, pp. 256-67.
6. AYRES, R.U. and KNEESE, A.V. « Production, Consumption, and Externalities, » *Amer. Econ. Rev.*, June 1969, 59(3), pp. 282-97.
7. BARGER, H. and SCHURR, S.H. *The Mining Industries, 1899-1939*. New York : National Bureau of Economic Research, 1944.
8. BARNETT, H.J. « Energy Use and Supplies, 1939, 1947, 1965, » Bureau of Mines Information Circular, 7582. Washington : U.S. Department of the Interior, October 1950.
9. BARNETT, H.J. and MORSE, C. *Scarcity and Growth : The Economics of Natural Resource Scarcity*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1963.
10. BECKERMAN, W. « Economists, Scientists, and Environmental Catastrophe, » *Oxford Econ. Pap.*, November 1972, 24(3), pp. 237-44.
11. BECKMANN, M.J. « A Note on the Optimal Rates of Resource Exhaustion, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 121-22.
12. BEDDINGTON, J.R., WATTS, C.M.K. and WRIGHT, W.D.C. « Optimal Cropping of Self-Reproducible Natural Resources, » *Econometrica*, July 1975, 43(4), pp. 789-802.
13. BELL, F.W. « The Pope and the Price of Fish, » *Amer. Econ. Rev.*, December 1968, 58(5), pp. 1346-50.
14. BELL, F.W. « Technological Externalities and Common Property Resources : An Empirical Study of the U.S. Northern Lobster Fishery, » *J. Polit. Econ.*, January/February 1972, 80(1), pp. 148-58.
15. BEVERTON, R.J.H. and HOLT, S.L. *On the Dynamics of Exploited Fish Populations*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Fishery Investigations, Series II, Vol. 19. London : Her Majesty's Stationary Office, 1957.
16. BOEREMA, L.K. and OBARRIO, J.L. « The Case for Regulation of the Shrimp Industry, » in *Economic Effects of Fisheries Regulation*, edited by R. Hamlish. FAO Fisheries Reports, No. 5. Rome : Food and Agriculture Organization, 1962, pp. 537-44.

17. BOULDING, K.E. « The Economics of the Coming Spaceship Earth, » in *Environmental Quality in a Growing Economy*, edited by H. Jarrett. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1966.
18. BRADLEY, P.G. *The Economics of Crude Petroleum Production*. Amsterdam : North-Holland Publishing, 1977.
19. BRADLEY, P.G. « Some Seasonal Models of the Fishing Industry, » in *Economics of Fisheries Management : A Symposium*, edited by A.D. Scott. Vancouver : Institute for Animal Resource Ecology, University of British Columbia, 1970, pp. 33-44.
20. BRANNON, G.M. *Energy Taxes and Subsidies*. Cambridge, Mass. : Ballinger Publishing, 1975.
21. BROBST, D.A. ; PRATT, W.P. and McKELVEY, V.E. « Summary of United States Mineral Resources, » Geological Survey Circular 682 (Also first two chapters in U.S. Geological Survey Professional Paper 820). Washington : Government Printing Office, 1973.
22. BROOKS, D.B. « The Lead-Zinc Anomaly, » in *Proceedings, Council of Economics, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1967, pp. 144-59.
23. BROWN, G.M. « An Optimal Program for Managing Common Property Resources with Congestion Externalities, » *J. Polit. Econ.*, January/February 1974, 82(1), pp. 163-75.
24. BROWN, G.M. and FIELD, B.C. « Measures of Growing Natural Resource Scarcity, » Mimeographed, University of Washington, Seattle, Washington, 1975.
25. BROWN, G.M. and HAMMACK, J. « A Preliminary Investigation of the Economics of Migratory Waterfowl, » in Krutilla, J.V., ed., *Natural Environments : Studies in Theoretical and Applied Analysis*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1972.
26. BROWN, G.M. and HAMMACK, J. « Dynamic Economic Management of Migratory Waterfowl, » *Rev. Econ. Statist.*, February 1973, 55(1), pp. 73-90.
27. BURT, O.R. « Optimal Use of Resources Over Time, » *Management Sci.*, September 1964, 11, pp. 80-93.
28. BURT, O.R. « Groundwater Management Under Quadratic Criterion Functions, » *Water Resources Research*, Third Quarter 1967, 3, pp. 673-82.
29. BURT, O.R. « Groundwater Storage Control Under Institutional Restrictions, » *Water Resource Research*, December 1970, 6(6), pp. 1540-48.
30. BURT, O.R. and CUMMINGS, R.G. « Production and Investment in Natural Resource Industries, » *Amer. Econ. Rev.*, September 1970, 60(4), pp. 576-90.
31. CAPEN, E.C. ; CLAPP, R.V. and CAMPBELL, W.M. « Competitive Bidding in High-Risk Situations, » *J. Petro. Tech.*, June 1971, 23, pp. 641-53.
32. CARLISLE, D. « The Economics of a Fund Resource with Particular Reference to Mining, » *Amer. Econ. Rev.*, September 1954, 44, pp. 595-616.
33. CHRISTY, F.T. and SCOTT, A. *The Common Wealth of Ocean Fisheries*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1965.



34. CICCETTI, C.J. and SMITH, V.K. « Congestion, Quality Deterioration, and Optimal Use : Wilderness Recreation in the Spanish Peaks Primitive Area, » *Social Sci. Research*, March 1973, 2(1), pp. 15-30.
35. CIRIACY-WANTRUP, S.V. *Resource Conservation : Economics and Politics*. Berkeley : University of California Press, 1952.
36. CLARK, C.W. « Profit Maximization and the Extinction of Animal Species, » *J. Polit. Econ.*, July/August 1973, 81(4), pp. 950-60.
37. CLARK, C.W. and MUNRO G.R. « The Economics of Fishing and Modern Capital Theory » *J. Environ. Econ. Management*, December 1975, 2(2), pp. 92-106.
38. COMITINI, S. and HUANG, D.S. « A Study of Production and Factor Shares in the Halibut Fishing Industry, » *J. Polit. Econ.*, August 1967, part I, 75, pp. 366-72.
39. CONSAD Research Corporation, « The Economic Factors Affecting the Level of Domestic Petroleum Reserves, » in *Tax Reform Studies and Proposals*, by U.S. Treasury Department, part 4 of Testimony before the Committee on Ways and Means, U.S. Congress. Washington : Government Printing Office, March 1969.
40. CORRY, A.V. and KIESSLING, O.E. *Grade of Ore*. Report No. E-6, Mineral Technology and Output per Man Studies. Philadelphia : Works Progress Administration, National Research Project, August 1938.
41. COURTNEY, L.H. « Jevons' Coal Question : Thirty Years After, » *J. Royal. Statist. Soc.*, December 1897, 15(4), pp. 789-810.
42. COX, D.P., *et al.* « Copper, » in *United States Mineral Resources*, edited by D.A. Brobst and W.P. Pratt, U.S. Geological Survey Professional Paper 820. Washington : Government Printing Office, 1973, pp. 163-90.
43. COX, J.C. and WRIGHT, A.W. « The Cost-effectiveness of Federal Tax Subsidies for Petroleum Reserves, » in *Studies in Energy Tax Policy*, edited by G.M. Brannon. Cambridge, Mass. : Ballinger Publishing, 1975, pp. 177-202.
44. CROMMELIN, M. and THOMPSON, A.R., eds. *Mineral Leasing as an Instrument of Public Policy*. Vancouver : University of British Columbia Press, 1976.
45. CRUTCHFIELD, J.A. « The Marine Fisheries : A Problem of International Cooperation, » *Amer. Econ. Rev.*, May 1964, 54(2), pp. 207-18.
46. CRUTCHFIELD, J. and ZELLNER, A. « Economic Aspects of the Pacific Halibut Fishery, » *Fishery Industrial Research*, U.S. Bureau of Commercial Fisheries, April 1962, 1(1).
47. CUMMINGS, R.G. « Some Extensions of the Economic Theory of Exhaustible Resources, » *Western Econ. J.*, September 1969, 7, pp. 201-10.
48. CUMMINGS, R.G. « Optimum Exploitation of Groundwater Reserves with Saltwater Intrusion, » *Water Resource Research*, December 1971, 7(6), pp. 1415-24.
49. D'ARCE, R.C. and KOGIKU, K.C. « Economic Growth and the Environment, » *Rev. Econ. Stud.*, January 1973, 40(1), pp. 61-78.
50. DASGUPTA, P. « On Some Alternative Criteria for Justice between Generations, » *J. Public Econ.*, November 1974, 3(4), pp. 405-23.

51. DASGUPTA, P. and HEAL, G. « The Optimal Depletion of Exhaustible Resources, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 3-28.
52. DASGUPTA, P. and STIGLITZ, J.E. « Uncertainty and the Rate of Extraction under Alternative Institutional Arrangements. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.
53. DAVIDSON, P. « Public Policy Problems of the Domestic Crude Oil Industry, » *Amer. Econ. Rev.*, March 1963, 53, pp. 85-108.
54. DEWHURST, J.F. and ASSOCIATES. *America's Needs and Resources*. New York : Twentieth Century Fund, 1947.
55. DEWHURST, J.F. and ASSOCIATES. *America's Needs and Resources*, 2d rev. ed. New York : Twentieth Century Fund, 1955.
56. DORFMAN, R. « The Technical Basis for Decisionmaking, » in *The Governance of Common Property Resources*, edited by E.T. Haefele. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1975.
57. ERICKSON, G.K. « Alaska's Petroleum Leasing Policy, » *Alaska Rev. Bus. Econ. Conditions*, July, 1970, 7(3).
58. FISHER, A.C. and KRUTILLA, J.V. « Resource Conservation, Environmental Preservation, and the Rate of Discount, » *Quart. J. Econ.*, August 1975, 89(3), pp. 358-70.
59. FISHER, A.C. and PETERSON, F.M. « The Environment in Economics, » *J. Econ. Lit.*, March 1976, 14(1), pp. 1-
60. FISHER, F.M. *Supply and Costs in the U.S. Petroleum Industry*. Washington : Resources for the Future, 1964.
61. GAFFNEY, M. « Concepts of Financial Maturity of Timber and Other Assets. » Agricultural Economics Information Series No. 62, North Carolina State College, Raleigh, North Carolina, December 1960.
62. GAFFNEY, M., ed. *Extractive Resources and Taxation*. Madison, Wis. : University of Wisconsin Press, 1967.
63. GARG, P.C. and SWEENEY, J.L. « Optimal Growth with Depletable Resources. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1974.
64. GASKINS, D.W. and TEISBERG, T. « An Economic Analysis of Pre-Sale Exploration in Oil and Gas Lease Sales, » in *Essays in Industrial Organization in Honor of Joe S. Bain*, edited by R. Masson and P.D. Qualls. Cambridge, Mass. : Ballinger Press, forthcoming.
65. GASKINS, D.W. and VANN, B. « Joint Buying and the Sellers Return : The Case of OCS Lease Sales. » Mimeographed, University of California, Berkeley, California, 1975.
66. GEORGESCU-ROEGEN, N. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press, 1971.
67. GILBERT, R. « Resource Depletion Under Uncertainty. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.
68. GILBERT, R. « Decentralized Exploration Strategies for Nonrenewable Resource Deposits. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.

69. GOLDSMITH, O.S. « Market Allocation of Exhaustive Resources, » *J. Polit. Econ.*, September/October 1974, 82(5), pp. 1035-40.
70. GORDON, H.S. « The Economic Theory of a Common Property Resource, » *J. Polit. Econ.*, April 1954, 62, pp. 124-42.
71. GORDON, R.L. « A Reinterpretation of the Pure Theory of Exhaustion, » *J. Polit. Econ.*, June 1967, 75, pp. 274-86.
72. GOULD, J.R. « Extinction of a Fishery by Commercial Exploitation : A note, » *J. Polit. Econ.*, September/October 1972, 80(5), pp. 1031-38.
73. GOUNDRY, G.K. « Forest Management and the Theory of Capital, » *Canadian J. Econ. Pol. Sci.*, August 1960, 26, pp. 439-51.
74. GRAY, L.C. « Rent Under the Assumption of Exhaustibility, » *Quart. J. Econ.*, May 1914, 28, pp. 466-89.
75. GRAYSON, C.J. *Decisions Under Uncertainty*. Boston : Harvard Business School, 1960.
76. HAMLISCH, R., ed. *Economic Effects of Fisheries Regulation*, FAO Fisheries Reports, No. 5. Rome : Food and Agriculture Organization, 1962.
77. HAMMACK, J. and BROWN, G.M. *Waterfowl and Wetlands : Toward Bio-Economic Analysis*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1974.
78. HARBERGER, A.C. « The Taxation of Mineral Industries, » in *Federal Tax Policy for Growth and Stability*, by U.S. Congress, Joint Committee on the Economic Report. Washington : Government Printing Office, 1955, pp. 439-49.
79. HARRIS, D.P. « An Application of Multivariate Statistical Analysis to Mineral Exploration, » Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, 1965.
80. HARRIS, D.P. « A Probability Model of Mineral Wealth, » *Trans. Soc. Mining Engineers*, June 1966, pp. 199-216.
81. HEAL, G. « The Influence of Interest Rates on Resource Prices, » Cowles Foundation Research Paper No. 407, Yale University, New Haven, Connecticut, 1975.
82. HERFINDAHL, O.C. *Copper Costs and Prices : 1870-1957*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1959.
83. HERFINDAHL, O.C. *Three Studies in Mineral Economics*. Washington : Resources for the Future, 1961.
84. HOLT, C.C. « How Can the Phillips Curve Be Moved to Reduce Both Inflation and Unemployment ? » in *Microeconomic Foundations of Employment and Inflation Theory*, by E.S. Phelps, et al. New York : W.W. Norton, 1970, pp. 224-56.
85. HOTELLING, H. « The Economics of Exhaustible Resources, » *J. Polit. Econ.*, April 1931, 39, pp. 137-75.
86. HUBBERT, M.K. « Energy Resources, » in *Resources and Man*, by National Academy of Sciences-National Resource Council-San Francisco : W.H. Freeman, 1969, pp. 157-242.
87. HUDSON, E.A. and JORGENSON, D.W. « U.S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000, » *Bell J. Econ. Management Sci.*, Autumn 1974, 5(2), pp. 461-514.

88. HUGHART, D. « Informational Asymmetry, Bidding Strategies, and the Marketing of Offshore Petroleum Leases, » *J. Polit. Econ.*, October 1975, 83(5), pp. 969-85.
89. HUMPHREY, D.B. and MORONEY, J.R. « Substitution Among Capital, Labor, and Natural Resource Products in American Manufacturing, » *J. Polit. Econ.*, February 1975, 83(1), pp. 57-82.
90. HUXLEY, T.H. « The Herring, » *Nature*, April 28, 1881, 23, pp. 607-13.
91. INGHAM, A. and SIMMONS, P. « Natural Resources and Growing Population, » *Rev. Econ. Stud.*, April 1975, 42, pp. 191-206.
92. ISE, J. « The Theory of Value as Applied to Natural Resources, » *Amer. Econ. Rev.*, June 1925, 15(2), pp. 284-91.
93. JEVONS, W.S. *The Coal Question*, 2d ed. London : MacMillan, 1865.
94. JUNGENSELT, K.G. « Some Problems in Forestry Economics. » Mimeographed, Stockholm School of Economics, Stockholm, Sweden, 1975.
95. KAHN, A.E. « Economic Issues in Regulating the Field Price of Natural Gas, » *Amer. Econ. Rev.*, May 1960, 50(2), pp. 506-17.
96. KALTER, R.J., STEVENS, T.H. and BLOOM, O.H. « The Economics of Outer Continental Shelf Leasing, » *Amer. J. Agri. Econ.*, May 1975, 5(2), pp. 251-53.
97. KALTER, R.J. and TYNER, W.E. « An Analysis of Contingency Leasing Options for Outer Continental Shelf Development. » Mimeographed, Cornell University, Ithaca, New York, 1975.
98. KAUFMAN, G.M. *Statistical Decision and Related Techniques in Oil and Gas Explorations*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1963.
99. KAUFMAN, G.M.
100. KOOPMANS, T.C. « Some Observations on 'Optimal' Economic Growth and Exhaustible Resources, » in *Economic Structure and Development : Essays in Honor of Jan Tinbergen*, edited by H.C. Bos, H. Linneemann, and P. de Wolff. Amsterdam : North Holland Publishing, 1973, pp. 239-55.
101. KOOPMANS, T.C. « Proof for a Case where Discounting Advances Doomsday, » *Rev. Econ. Stud.*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, 1974, pp. 117-20.
102. KRUTILLA, J.V. and FISHER, A.C. *The Economics of Natural Environments : Studies in the Valuation of Commodity and Amenity Resources*. Baltimore : Johns Hopkins Press, 1975.
103. KULLER, R.G. and CUMMINGS, R.G. « An Economic Model of Production and Investment for Petroleum Reservoirs, » *Amer. Econ. Rev.*, March 1974, 64(1), pp. 66-79.
104. KUZNETS, S. *National Product Since 1869*. New York : National Bureau of Economic Research, 1946.
105. LANDSBERG, H.H., FISCHMAN, L.L. and FISHER, J.L. *Resources in America's Future*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1963.
106. LELAND, H.E. « Optimal Risk Sharing and the Leasing of Natural Resources. » Working Paper No. 38, Institute of Business and Economic Research, University of California, Berkeley, California, 1975.

107. LELAND, H.E. ; NORGAARD, R. and PEARSON, S. « An Economic Analysis of Alternative Outer Continental Shelf Petroleum Leasing Policies. » Mimeographed, University of California, Berkeley, California, 1974.
108. LEONTIEF, W.W. *The Structure of the American Economy, 1919-1929*, Cambridge, Mass. : Harvard University Press, 1941.
109. LONG, N.V. « Resource Extraction Under Uncertainty about Possible Nationalization, » *J. Econ. Theory*, February 1975, pp. 42-53.
110. LOTKA, A.J. *Elements of Mathematical Biology*. 1925. Reprint. New York : Dover Publications, 1956.
111. MACAVOY, P.W. and PINDYCK, R.S. *The Economic of the Natural Gas Shortage (1960-1980)*. Amsterdam : North Holland Publishing, 1975.
112. McDONALD, S.L. *Federal Tax Treatment of Oil and Gas*. Washington : The Brookings Institution, 1963.
113. McKIE, J.W. « Market Structure and Uncertainty in Oil and Gas Exploration, » *Quart. J. Econ.*, November 1960, 74, pp. 543-71.
114. MALINVAUD, E. « Capital Accumulation and Efficient Allocation of Resources, » *Econometrica*, April 1953, 21(2), pp. 233-68.
115. MANNE, A.S. « Waiting for the Dreeder, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 47-65.
116. MARGLIN, S.A. « The Social Rate of Discount and the Optimal Rate of Investment, » *Quart. J. Econ.*, February 1963, 77, pp. 95-112.
117. MARSHALL, A. *Principles of Economics*, 4th ed. London : MacMillan, 1898.
118. MEAD, W.J. « Natural Resource Disposal Policy : Oral Auctions versus Sealed Bids, » *Natural Resources J.*, April 1967, 7, pp. 194-224.
119. MEADOWS, D.H. *et al. The Limits to Growth*. New York : Universe Books, 1972.
120. MILL, J.S. *Principles of Political Economy*, 6th Edition. 1865. Reprint. New York : Augustus M. Kelley, 1965.
121. MOHRING, H. « The Costs of Inefficient Fishery Regulation : A Partial Study of the Pacific Coast Halibut Industry. » Mimeographed, University of Minnesota, Minneapolis, 1974.
122. MOORE, W.J. *Physical Chemistry*, 2d ed. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1955, Ch. 17.
123. MUSGROVE, P. « The Distribution of Metal Resources (Tests and Implications of the Exponential Grade-Size Relation), » *Proceedings of the Council of Economics of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME)*. New York : AIME, 1971, pp. 340-471.
124. NEHER, P.A. « Notes on the Volterra-Quadratic Fishery, » *J. Econ. Theory*, May, 1974, 8(1), pp. 39-49.
125. NETSCHERT, B.C. *The Future Supply of Oil and Gas*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1953.
126. NETSCHERT, B.C. and LANDSBERG, H.H. *The Future Supply of the Major Metals*. Washington : Resources for the Future, 1961.
127. NORDHAUS, W.D. « World Dynamics - Measurement Without Data. » *Econ. J.*, December 1973, 82(332), pp. 1156-83.

128. NORDHAUS, W.D. « The Allocation of Energy Resources, » *Brookings Pap.*, 1973, 3, pp. 529-70.
129. NORDHAUS, W.D. « Resources as a Constraint on Growth, » *Amer. Econ. Rev.*, May 1974, 64(2), pp. 22-26.
130. Organization for Economic Cooperation and Development, *Economic Aspects of Fish Production : International Symposium on Fishery Economics, Paris, 29 November to 3 December, 1971*. Paris : Organization for Economic Cooperation and Development, 1972.
131. OREN, M.E. and WILLIAMS, A.C. « On Competitive Bidding, » *Operations Research*, November-December, 1975, 23(6), pp. 1072-79.
132. PAISH, F.W. « Causes of Changes in Gold Supply, » *Economica*, November 1938, New Series, 5, pp. 379-409.
133. PEIRCE, W.S. « Factors Affecting Responsiveness to Technological Innovations in Coal Mining, » Working Paper No. 54, Research Program in Industrial Economics, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1974.
134. PETERSON, F.M. « Theory of Exhaustible Natural Resources : A Classical Variational Approach, » Ph.D. Dissertation, Princeton University, 1972, Ch. III.
135. PETERSON, F.M. « Two Externalities in Petroleum Exploration, » in *Studies in Energy Tax Policy*, edited by G.M. Brannon, Cambridge, Mass. : Ballinger Publishing, 1975, pp. 101-13.
136. PETERSON, F.M. « A Theory of Mining and Exploring for Exhaustible Resources. » Mimeographed, University of Maryland, College Park, Maryland, 1975.
137. PETERSON, F.M. « The Long Run Dynamics of Minerals Taxation. » Mimeographed, University of Maryland, College Park, Maryland, 1975.
138. PETERSON, F.M. « An Economic Theory of Mineral Leasing, » in *Mineral Leasing as an Instrument of Public Policy*, edited by M. Crommelin and A.R. Thompson. Vancouver : University of British Columbia Press, 1976.
139. PHELPS, E.S. and RILEY, J.G. « Rawlsian Growth : Dynamic Programming of Capital and Wealth for Intergenerational 'Maximin' Justice, » *Rev. Econ. Stud.*, in press.
140. PIGOU, A.C. *The Economics of Welfare*, 4th ed. London : MacMillan, 1932, pp. 29-30.
- 140A. FLOURDE, C.G. « A Simple Model of Replenishable Natural Resource Exploitation, » *Amer. Econ. Rev.*, June 1970, 60, pp. 518-22.
141. FLOURDE, C.G. « Exploitation of Common Property Replenishable Natural Resources, » *Western Econ. J.*, September 1971, 9(3), pp. 256-66.
142. PONTRYAGIN, L.S. ; BOLTJANSKII, V.G. ; GAMKRELIDZE, R.V. and MISHCHENKO, E.F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. Translated by K.N. Trifogoff. New York : John Wiley and Sons, Interscience Publishers, 1962.
143. POTTER, N. and CHRISTY, F.T., Jr. *Trends in Natural Resource Commodities : Statistics of Prices, Output, Consumption, Foreign Trade*

*and Employment in the United States 1870-1957*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1962.

144. QUIRK, J.P. and SMITH, V.L. « Dynamic Models of Fishing, » in *Economics of Fisheries Management : A Symposium*, edited by A.D. Scott. Vancouver : Institute of Animal Resource Ecology, University of British Columbia, 1970, pp. 3-32.

145. RAMSEY, F.P. « A Mathematical Theory of Saving, » *Econ. J.*, December 1928, 38, pp. 542-59.

146. RAWLS, J. *A Theory of Justice*. Cambridge : Harvard University Press, 1971.

147. ROSENBERG, N. « Innovative Responses to Materials Shortages, » *Amer. Econ. Rev.*, May 1973, 63(2), pp. 111-18.

148. ROTHKOPF, M.R. « A Model of Rational Competitive Bidding, » *Management Sci.*, March 1969, 15(7), pp. 362-73.

149. SAMUELSON, P.A. « Economics of Forestry in an Evolving Society, » presented at Symposium on « The Economics of Sustained Yield Forestry, » College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Washington, November 23, 1974. Conference volume forthcoming.

150. SCHAEFER, M.B. « Some Aspects of the Dynamics of Populations to the Management of the Commercial Marine Fisheries, » *Bulletin*, 1954, 1(2), Inter American Tropical Tuna Commission, LaJolla, California, pp. 26-56.

151. SCHAEFER, M.B. « Some Considerations of Population Dynamics and Economics in Relation to the Commercial Marine Fisheries, » *J. Fisheries Research Board of Canada*, September 1957, 14(5), pp. 669-81.

152. SCHULZE, W.D. « The Optimal Use of Non-Renewable Resources : The Theory of Extraction, » *J. Environ. Econ. Management*, May 1974, 1(1), pp. 53-73.

153. SCHURR, S.H. and NETSCHERT, B.C. *Energy in the American Economy, 1850-1975 : An Economic Study of its History and Prospects*. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1960.

154. SCOTT, A.D. « Notes on User Cost, » *Econ. J.*, June 1953, 63(250), pp. 368-84.

155. SCOTT, A.D. *Natural Resources : The Economics of Conservation*. Toronto : University of Toronto Press, 1955.

156. SCOTT, A.D. « The Fishery : The Objectives of Sole Ownership, » *J. Polit. Econ.*, April 1955, 63, pp. 116-24.

157. SCOTT, A.D., ed. *Economics of Fisheries Management : A Symposium*. Vancouver : Institute of Animal Resource Ecology, University of British Columbia, 1970.

158. SINGER, D.A. ; COX, D.P. and DREW, L.J. « Grade and Tonnage Relationships Among Copper Deposits, » Geological Survey Professional Paper 907-A, U.S. Geological Survey. Washington : Government Printing Office, 1975.

159. SINGER, D.A. « Mineral Resource Models and the Alaskan Mineral Resource Assessment Program, » in *Non-Fuel Mineral Models : A State*

of the Art Review, edited by W. Vogely. Baltimore : The Johns Hopkins Press, 1976.

160. SMITH, V.K. « Re-Examination of the Trends in the Prices of Natural Resource Commodities, 1870-1972, » Working Paper No. 44, Economic Growth Institute, State University of New York, Binghamton, New York, November 1974.

161. SMITH, V.L. « Economics of Production From Natural Resources, *Amer. Econ. Rev.*, June 1968, 53(3), pp. 409-31.

162. SMITH, V.L. « On Models of Commercial Fishing, » *J. Polit. Econ.*, March/April 1969, 77(2), pp. 181-98.

163. SMITH, V.L. « The Primitive Hunter Culture, Pleistocene Extinction, and the Rise of Agriculture, » *J. Polit. Econ.*, August 1975, 83(4), pp. 727-55.

164. SOLOW, R.M. « Richard T. Ely Lecture: The Economics of Resources or the Resources of Economics, » *Amer. Econ. Rev.*, May 1974, 64(2), pp. 1-14.

165. SOLOW, R.M. « Intergenerational Equity and Exhaustible Resources, » *Rev. Econ. Stud.*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, 1974, pp. 29-45.

166. SOUTHEY, C. « Policy Prescriptions in Economic Models. » The Case of the Fishery, » *J. Polit. Econ.*, July/August 1972, 80(4), pp. 769-75.

167. SPENCE, A.M. « Blue Whales and Applied Control Theory, » in *Systems Approaches and Environmental Problems*, edited by H.W. Gottinger. Gottingen : Vandenhoeck and Ruprecht.

168. STEELE, H. « Cost Trends and the Supply of Crude Oil in the United States : Analysis and 1973-1985 Supply Schedule Projections, » in *Energy : Demand, Conservation, and Institutional Problems*, edited by M.S. Macrakis. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1974, pp. 303-17.

169. STEINER, P.O. « Percentage Depletion and Resource Allocation, » in *Tax Revision Compendium*, by U.S. Congress, House Committee on Ways and Means. Washington : Government Printing Office, 1959, pp. 949-66.

170. STIGLITZ, J.E. « Growth with Exhaustible Natural Resources : Efficient and Optimal Growth Paths, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 123-37.

171. STIGLITZ, J.E. « Growth with Exhaustible Natural Resources : The Competitive Economy, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 139-52.

172. STIGLITZ, J.E. « The Efficiency of Market Prices in Longrun Allocations in the Oil Industry, » in *Studies in Energy Tax Policy*, edited by G.M. Brannon. Cambridge, Mass. : Ballinger Publishing, 1975, pp. 87-94.

173. STIGLITZ, J.E. « Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.

174. SWEENEY, J.L. « Economics of Depletable Resources : Market Forces and Intertemporal Bias, » *Rev. Econ. Stud.*, in press.



175. TALBOT, L.M. « Maximum Sustainable Yield : An Obsolete Concept, » Paper presented at the Technical Session on Living Marine Resources, 40th North American Wildlife and Natural Resources Conference, Pittsburgh, Pa., March 17, 1975. Mimeographed. Conference volume forthcoming.
176. TURVEY, R. « Optimization and Suboptimization in Fishery Regulation, » *Amer. Econ. Rev.*, March 1964, 54(1), pp. 54-76.
177. TURVEY, R. and WISEMAN, J., eds. *The Economics of Fisheries : International Economics Association Round Table in Rome, September 1956*. Rome : Food and Agriculture Organization, 1957.
178. UHLER, R.S. « Petroleum Exploration Dynamics. » Mimeographed, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, January 1975.
179. UHLER, R.S. and BRADLEY, P.G. « A Stochastic Model for Determining the Economic Prospects of Petroleum Exploration Over Large Regions, » *J. Amer. Statist. Assoc.*, June 1970, ?
180. U.S. Commission on Population Growth and the American Future. *Population, Resources, and the Environment*, edited by R.G. Ridker. Vol. III of Commission Research Reports. Washington : Government Printing Office, 1972.
181. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Data Service, *Ocean Data Resources*, Washington, June 1974.
182. U.S. Federal Energy Administration. *Project Independence Report*. Washington : Government Printing Office, November 1974.
183. U.S. Geological Survey, *United States Mineral Resources*, edited by D.A. Brobst and W.P. Pratt, U.S. Geological Survey Professional Paper 820. Washington : Government Printing Office, 1973, pp. 22-23, 140, 613-14.
184. U.S. Laws, Statutes, etc., *Statutes at Large*, Vol. 74, pp. 215. (The Multiple-Use Sustained-Yield Act of 1960, Public Law 86-517.
185. U.S. President's Materials Policy Commission, *Resources for Freedom*, Five Volumes, Washington : Government Printing Office, 1952.
186. VAN MEIR, L.W. « A Study of Policy Considerations in Managing the Georges Bank Haddock Fishery, » in *Recent Developments and Research in Fisheries Economics*, edited by F.W. Boll and J.E. Hazelton. Dobbs Ferry, N.Y. : Ocoana Publications, 1967, pp. 197-209.
187. VOUSDEN, N. « Basic Theoretical Issues in Resource Depletion, » *J. Econ. Theory*, April 1973, 6(2), pp. 126-43.
188. WEINSTEIN, M.C. and ZECKHAUSER, R.J. « Use Patterns for Depletable and Recycleable Resources, » *Rev. Econ. Stud.*, *Symposium on The Economics of Exhaustible Resources*, 1974, pp. 67-88.
189. WEINSTEIN, M.C. and ZECKHAUSER, R.J. « The Optimal Consumption of Depletable Natural Resources, » *Quart. J. Econ.*, August 1975, 89(3), pp. 371-92.
190. WILSON, R. « Price Formation Via Competitive Bidding. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.

191. WILSON, R. « On the Incentive for Information Acquisition in Competitive Bidding with Asymmetrical Information. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1975.
192. WILSON, R. « Comment on David Hughart, Informational Asymmetry, Bidding Strategies and the Marketing of Offshore Petroleum Leases. » Mimeographed, Stanford University, Palo Alto, California, 1976.
193. ZELLNER, A. « Management of Marine Resources : Some Key Problems Requiring Additional Analysis, » in *Economics of Fisheries Management : A Symposium*, edited by A.D. Scott, Vancouver : Institute of Animal Resource Ecology, University of British Colombia, 1970, pp. 109-19.